

Verbesserte Rückstaulängenschätzung vor Lichtsignalanlagen mittels hochfrequenter Floating Car Data (FCD).

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Engineering „M.Eng.“

an der Technischen Hochschule Wildau

Technische Hochschule Wildau
Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften (INW)

Studiengang Telematik

eingereicht am: 14.10.2013

eingereicht von: Dalibor Iljkic

geb. am: 14.01.1987

Betreuer: Prof. Dr.- Ing. Anselm Fabig

Themenstellender Betrieb: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) ,
Institut für Verkehrssystemtechnik, Berlin

Kurzfassung

Im Rahmen der Masterarbeit die ein vom DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik entwickeltes Modell zur Rückstaulängenschätzung mittels hochfrequenter Floating Car Daten (FCD) vor Lichtsignalanlagen validiert. Hierbei wird das Potential des von Dr. Thorsten Neumann entwickelten Rückstaulängenschätzers „Density Profile Analyzer“ mit hochfrequenten FCD getestet. Des Weiteren wird in der Arbeit ein neues einfacheres Verfahren zur Rückstaulängenschätzung „Simple Queue Length Estimator“ basierend auf hochfrequenten FCD vorgestellt.

Damit ein Grundverständnis über die Rückstaulängenschätzung und die FCD sichergestellt wird, werden innerhalb der Arbeit die Grundlagen der Gewinnung von FCD und herkömmliche Ansätze zur Rückstaulängenschätzung beschrieben.

Des Weiteren wird die Implementierung einer Webserviceschnittstelle, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, erläutert. Die Schnittstelle soll die positions- und fahrzeugbasierte Daten der DLR Messfahrzeuge am Standort Braunschweig für das Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR am Standort Berlin in Echtzeit verfügbar machen. Neben einem Überblick über den SOAP-Webservice bietet diese Arbeit einen Einblick in die Planung und Ausführung einer Messkampagne zur Erhebung von hochfrequenten FCD. Um eine Referenz zu realen Rückstaulängen zu schaffen, wurden im Rahmen der Messkampagne neben den FCD zusätzlich Videodaten erhoben.

Die Arbeit beinhaltet eine Analyse und Schätzfehleranalyse der Schätzergebnisse der beiden Rückstaulängenschätzer im Vergleich zu den realen durchschnittlichen Rückstaulängen, welche im Rahmen einer mehrtägigen Messkampagne erhoben wurden. Im Validierungsprozess des „DPAnalyzers“ werden hochfrequente und Taxi-FCD eingesetzt. Abschließend werden die Schlussbetrachtung der Ergebnisse, Optimierungsvorschläge und die Zukunftsaussicht der Rückstaulängenschätzung mit FCD vorgestellt.

Abstract

Within this master thesis, a model for queue length estimation in front of traffic lights using high frequent Floating Car Data (FCD), developed by the Institute of Transportation Systems at German Aerospace Center (DLR), will be validated. In this context the potential of the queue length estimator “Density Profile Analyzer“, developed by Dr. Thorsten Neumann, will be tested with high frequent FCD. Furthermore, a new simple method for queue length estimation “Simple Queue Length Estimator” based on high frequent FCD is presented in this work.

To ensure the understanding of queue length estimation and FCD, the basic principles of FCD extraction and conventional approaches of queue length estimation are described.

Also, the implementation of a web service which was developed in this work is explained. This interface was developed to ensure the availability of position and vehicle based data in real time, collected by DLR measurement vehicles in Brunswick, at the DLR Institute of Transportation Systems in Berlin. Furthermore, basics about SOAP web services can be found in this document as well as an overview about the planning and execution of the measurement campaign for the collection of high frequent FCD is given. To create a reference to real queue lengths besides FCD, video data has been collected during the measurement campaign.

In addition, this work offers an analysis and estimation fault analysis of the queue length estimation results in comparison to the real average queue lengths which were acquired during the measurement campaign. During the validation process of the „DPAnalyzer“, high frequent as well as taxi FCD have been used. Finally, an analysis of the results, suggestions regarding further improvements and future prospects of queue length estimation with high frequent FCD are presented.

Bibliografische Beschreibung und Referat

Dalibor Iljkic

Verbesserte Rückstaulängenschätzung vor Lichtsignalanlagen mittels hochfrequenter Floating Car Data (FCD)

Masterarbeit, Technische Hochschule Wildau (FH) 2013, 108 Seiten, 35 Abbildungen, 4 Tabellen, 30 Diagramme, 50 Literaturangaben, 1 Anlage (CD)

Ziel:

Validierung der Rückstaulängenschätzung vor Lichtsignalanlagen mittels hochfrequenter Floating Car Data mit Hilfe realer Rückstaulängen erhobenen im Rahmen einer Messkampagne.

Inhalt:

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Möglichkeiten der Rückstaulängenschätzung vor Lichtsignalanlagen mittels hochfrequenter Floating Car Data analysiert. Die Voraussetzungen für die Analyse war die Entwicklung einer Schnittstelle über welche die fahrzeug- und positionsrelevanten Daten in Echtzeit übertragen werden können. Des Weiteren wurde im Rahmen der Arbeit eine Messkampagne zur Erfassung hochfrequenter Floating Car Data und der realen Rückstaulängen für den betrachteten Kreuzungsarm durchgeführt. Mittels dieser Daten wurden ein einfaches Verfahren zur Rückstaulängenschätzung mittels hochfrequenter FCD, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, und der „DPAnalyzer“ validiert. Diese Schätzergebnisse wurde verglichen und anschließend eine Schätzergebnisanalyse, Schätzfehleranalyse und Verbesserungsanalyse vorgenommen.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Masterabschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, alle Ausführungen, die anderen Schriften wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, kenntlich gemacht sind und die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung war.

(Ort, Datum)

(Unterschrift Dalibor Iljkic)

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Abstract.....	II
Bibliografische Beschreibung und Referat	III
Selbstständigkeitserklärung	IV
Inhaltsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis	IX
Diagrammverzeichnis	X
Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen.....	XII
Glossar	XV
1. Einleitung.....	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielstellung.....	2
1.3 Aufbau und Vorgehensweise	3
2. Rückstaulängenschätzung vor Lichtsignalanlagen	5
2.1 Verkehrsadaptive Lichtsignalanlagensteuerung.....	5
2.2 Rückstaulängenschätzung vor Lichtsignalanlagen.....	6
2.2.1 Motivation der Rückstaulängenschätzung vor Lichtsignalanlagen	6
2.2.2 Schätzverfahren mittels Floating Car Data von Thorsten Neumann - DPAnalyzer	6
2.2.2.1 Einführung.....	6
2.2.2.2 Funktionsweise des neuen Ansatzes	8
2.2.2.3 Auswertung der bisherigen Simulations- und Testergebnissen	10
2.2.2.4 Zukunftsaussichten des neuen Ansatzes.....	11
2.2.3 Herkömmliche Ansätze zur Rückstaulängenschätzung vor Lichtsignalanlagen	12
2.2.3.1 Schätzverfahren mittels Induktivschleifendetektoren von Jürgen Mück.....	12
2.2.3.2 Schätzverfahren mittels C2I-Daten von Christian Primer.....	13
2.2.3.3 Statistische Methode zur Rückstaulängenschätzung von Comert und Cetin.....	15
3. Verkehrslagenerfassung mittels Floating Car Data	18
3.1 Betrachtung der FCD als Mittel zur Verkehrslageerfassung.....	18
3.2 Vorgang der Erfassung von FCD am Beispiel DLR	19
3.2.1 Ortung mittels Global Positioning System	20
3.2.2 Map-Matching Verfahren.....	21
3.3 Extended Floating Car Data (xFCD)	23
3.4 Weitere Ansätze zur mobilen Verkehrslageerfassung	24
4. Planung und Realisierung der Messkampagne	25

4.1	Erwartungen von der Messkampagne	25
4.2	Entwicklung der Schnittstelle zwischen DOMINION und TDP Service Framework	26
4.2.1	Erläuterung der bestehenden Systeme	26
4.2.2	Anforderungen an die Schnittstelle	27
4.2.3	Grundlagen SOAP	29
4.2.4	Umsetzung	32
4.2.4.1	ServiceHub und der Webservice	32
4.2.4.2	Datenfluss	34
4.2.4.3	Datenbank	35
4.2.4.4	TrackingDataService	36
4.2.4.5	Test der Schnittstelle	37
4.2.5	Zukunftsperspektive der entwickelten Schnittstelle	39
4.3	Planung und Durchführung der Messkampagne	39
4.3.1	Auswahl der Kreuzungen	40
4.3.2	Einsatzplanung und Ausstattung der Messfahrzeuge	42
4.3.3	NDS-Plattform	43
4.3.4	Erforderliche Genehmigungen zur Durchführung der Messkampagne	44
4.4	Systematische Auswertung der Messdaten	44
5.	Validierung der Rückstaulängenschätzung mittels FCD	49
5.1	Implementierung eines einfachen Verfahrens zur Rückstaulängenschätzung	49
5.2	Programm für die Rückstaulängenschätzung	51
5.3	Potentialanalyse von hochfrequenten FCD in der Rückstaulängenschätzung	55
5.3.1	Schätzergebnisse ohne Datenfusion	56
5.3.2	DPAnalyzer-Datenfusion und Betrachtung der neuen Ergebnisse	61
5.3.2.1	Bestimmung der realen Reisezeiten	62
5.3.2.2	Berechnung der Referenzverlustzeiten	63
5.3.2.3	Berechnung der „DPAnalyzer“-basierten Verlustzeiten	64
5.3.2.4	Schätzergebnisse mit Datenfusion	66
5.3.3	Schätzfehleranalyse	69
5.3.4	Schlussbetrachtung der Schätzergebnisse	71
5.4	Potentialanalyse von Taxi-FCD in der Rückstaulängenschätzung	72
5.4.1	Schätzergebnisse ohne Datenfusion	73
5.4.2	Schätzergebnisse mit Datenfusion	74
5.4.3	Schätzfehleranalyse	77
5.4.4	Schlussbetrachtung der Schätzergebnisse	79
6.	Zusammenfassung und Ausblick	82
Literatur		XIX
Anhang		XXIV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Nagel-Schreckenberg-Modell	9
Abbildung 2. Schätzfehler ohne und mit Datenfusion in Abhängigkeit von der Abdeckung und Meldeintervall.....	11
Abbildung 3. Beispiel der Belegung von einem Schleifendetektor	13
Abbildung 4. TRAVOLUTION von AUDI das die C2I Kommunikation benutzt um	14
Abbildung 5. Die Distanzfunktion($f_d(x)$) zur Bestimmung des Fahrstreifens und der Distanz des Fahrzeugs zur LSA	14
Abbildung 6. Der Ansatz für Rückstaulängenbestimmung von Primer	14
Abbildung 7. Schnappschuss von einer Kreuzung vor Ende der Rotphase	16
Abbildung 8. Aufbau des FCD Datenerfassungssystems von Taxi bis zur Verwendung, Beispiel DLR	20
Abbildung 9. Ermittlung der aktuellen Empfängerposition mittels Satellitennavigation	21
Abbildung 10. Das Map-Matching Problem	22
Abbildung 11. DOMINION Funktionsweise.....	26
Abbildung 12. TDP ServiceFramework – Kommunikation.....	27
Abbildung 13. Aufbau einer SOAP Nachricht	30
Abbildung 14. SOAP Kommunikation - Requests und Responses Beispiel	30
Abbildung 15. ServiceHub – Architektur des Datenaustauschs	33
Abbildung 16. Ein Abschnitt der WSDL Datei.....	33
Abbildung 17. Datenfluss der xFCD von DOMINION bis zur AIM Datenbank.....	34
Abbildung 18. Webservice Tabellengenerierungsanweisung	35
Abbildung 19. Aufbau des TDPMMessage Objekts.....	36
Abbildung 20. Test-Soap Request.....	38
Abbildung 21. Fehlermeldung bei einer ungültigen SessionID	38
Abbildung 22. Test SOAP Response ohne Fehler	38
Abbildung 23. Braunschweiger Ring und die interessanten Kreuzungen und zugehörige Identifikation.....	40
Abbildung 24. DLR Messfahrzeug - UTRaCar.....	42

Abbildung 25. NDS Plattform – Topologie	43
Abbildung 26. Datenfluss der Erfassungsdaten von xFCD bis zur Karten-Matches.....	46
Abbildung 27. Betrachtung der Funktionsweise des „SQLEstimators“ anhand von vier Fällen	51
Abbildung 28. Problem der Berechnung der Entfernung vom Straßenabschnittbeginn	52
Abbildung 29. Bestimmung der realen Haltelinienentfernung.....	54
Abbildung 30. Datenfluss der Rückstaulängenschätzung mit anschließender graphischer Darstellung.....	55
Abbildung 31. Untersuchung der FCD Anhäufungen	60
Abbildung 32. Untersuchung der Abweichungen mittels Videodaten	61
Abbildung 33. Reisezeitenberechnung mittels FCD	62
Abbildung 34. Beispiel der Reisezeitenberechnung aus dem Matches-Dokument	63
Abbildung 35. „DPAnalyzer“ verlustzeitbasierte Datenfusion	65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Liste der Parameter des DPAnalyzers.....	10
Tabelle 2. Übersicht der Daten die über die Schnittstelle übertragen werden.....	28
Tabelle 3. Webserviceschnittstellenanforderungstabelle.....	29
Tabelle 4. Ausgewählte Kreuzungen - Messkampagne	41

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1. Auswertung von FCD Meldungen für die Forschungskreuzung (K047) in Braunschweig für Monat Mai (Abstände 1 Meter)	7
Diagramm 2. Belegungswahrscheinlichkeit(rot) im Vergleich zu der Häufung der FCD Meldungen	8
Diagramm 3. Beispiel der Unter- und Übersättigung (q = Verkehrsnachfrage pro Zeiteinheit)	9
Diagramm 4. Variation des Fehlers im Vergleich zur Anzahl der Meldefahrzeuge in der Warteschlange	16
Diagramm 5. Forschungskreuzung K047 südlicher Kreuzungsarm – Taxi FCD Meldungen für Monat Mai	41
Diagramm 6. Ergebnisse der Videodatenauswertung für die Kreuzung K047, westlicher Kreuzungsarm (stündliche Auswertung)	47
Diagramm 7. Ergebnisse der Videodatenauswertung für die Kreuzung K047, westlicher Kreuzungsarm (10-Minutige Auswertung)	47
Diagramm 8. Ergebnisse der Videodatenauswertung für die Kreuzung K020, westlicher Kreuzungsarm (stündliche Auswertung)	48
Diagramm 9. Ergebnisse der Videodatenauswertung für die Kreuzung K020, westlicher Kreuzungsarm (10-Minutige Auswertung)	48
Diagramm 10. Beispiel der Funktionsweise des „SQLEstimators“ als Diagramm	50
Diagramm 11. Geschätzte Rückstaulängen für die Kreuzung K020 – östlicher Kreuzungsarm	56
Diagramm 12. Schätzfehler in Fahrzeuglängen mit der Angabe von Verfügbaren FCD Meldungen für die jeweilige Stunde – K020	57
Diagramm 13. Geschätzte Rückstaulängen für die Kreuzung K047 – westlicher Kreuzungsarm	58
Diagramm 14. Schätzfehler in Fahrzeuglängen mit der Angabe von Verfügbaren FCD Meldungen für die jeweilige Stunde – K047	58
Diagramm 15. Verteilung der FCD Meldungen innerhalb Stunde 7 vor der LSA an der Kreuzung K020 östlicher Kreuzungsarm	60
Diagramm 16. Reise- und Verlustzeiten im Vergleich zu der Anzahl der FCD Meldungen – Kreuzung K020	64

Diagramm 17. Ein Beispiel der Begrenzung des Ergebnishorizonts mit Einsatz von Datenfusion.....	66
Diagramm 18. Diagramm der geschätzten Rückstaulängen mit Datenfusion für die Kreuzung K020 – östlicher Kreuzungsarm	68
Diagramm 19. Diagramm der geschätzten Rückstaulängen mit Datenfusion für die Kreuzung K047 – westlicher Kreuzungsarm.....	69
Diagramm 20. Schätzfehleranalyse mit und ohne Datenfusion für die Kreuzung K020 – östlicher Kreuzungsarm	70
Diagramm 21. Schätzfehleranalyse mit und ohne Datenfusion für die Kreuzung K047 – westlicher Kreuzungsarm	71
Diagramm 22. Geschätzten Rückstaulängen für die Kreuzung K020 – östlicher Kreuzungsarm mittels TaxiFCD	73
Diagramm 23. Geschätzten Rückstaulängen für die Kreuzung K047 – westlicher Kreuzungsarm mittels Taxi-FCD.....	74
Diagramm 24. Geschätzten Rückstaulängen mit Datenfusion(Verlustzeiten Taxi-FCD) für die Kreuzung K020 – östlicher Kreuzungsarm mittels Taxi-FCD.....	75
Diagramm 25. Geschätzten Rückstaulängen mit Datenfusion(Verlustzeiten Messkampagne) für die Kreuzung K020 – östlicher Kreuzungsarm mittels TaxiFCD	76
Diagramm 26. Geschätzten Rückstaulängen mit Datenfusion(Verlustzeiten Taxi-FCD) für die Kreuzung K047 – westlicher Kreuzungsarm mittels Taxi-FCD	76
Diagramm 27. Geschätzten Rückstaulängen mit Datenfusion(Verlustzeiten Messkampagne) für die Kreuzung K047 – westlicher Kreuzungsarm mittels Taxi-FCD ...	77
Diagramm 28. Schätzfehleranalyse mit und ohne Datenfusion für die Kreuzung K020 – östlicher Kreuzungsarm K020 – östlicher Kreuzungsarm (Taxi-FCD)	78
Diagramm 29. Schätzfehleranalyse mit und ohne Datenfusion für die Kreuzung K020 – östlicher Kreuzungsarm K047 – westlicher Kreuzungsarm (Taxi-FCD)	79
Diagramm 30. Ergänzung der FCD- Anzahl für die Kreuzung K020 - östlicher Kreuzungsarm mit Taxi-FCD	80

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

ACC	Automotive Cruise Control	-
ADAS	Advanced Driver Assistance System	-
AIM	Anwendungsplattform Intelligente Mobilität	-
CAN	Controller Area Network	-
Car2I	Car-To-Infrastructure-Kommunikation	-
Car2X	Car-To-X-Kommunikation des Fahrzeugs mit der Umgebung	-
CSV	comma-separated values	-
d	Delay (Verlustzeit)	Sekunden (s)
d(q)	Funktion zur Berechnung der Verlustzeiten basierend auf Rückstaulängen	-
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	-
DPAlyzer	Density Profile Analyzer	-
DSL	Digital Subscriber Line	-
$E(\text{Var}(N L_p))$	Schätzfehler in Fahrzeuglängen (Comert und Cetin)	-
FCD	Floating Car Data	-
$f_d(x)$	Distanzfunktion zur Bestimmung des Fahrstreifens und der Fahrzeugdistanz (Rückstaulängenschätzer von Primer)	-
FPD	Floating Phone Data	-
g	Grünphasendauer	Sekunden (s)
GPRS	General Packet Radio Services	-
GPS	Global Positioning System	-
HTTP	HyperText Transfer Protocol	-
ID	Identität	-
IP	Internet Protokoll	-
ITS	Intelligente Transport Systeme	-
JMS	Java Message Service	-
JSON	Javascript Object Notation	-
K	Kreuzung	-

KML	Keyhole Markup Language	-
L	Rückstaulänge	Meter (m)
l	Straßenabschnittslänge	Meter (m)
L(q)	betrachtete durchschnittliche Rückstaulänge in Zellen	-
L _{max}	maximale Rückstaulänge im Gesamtsegment in Zellen	-
LSA	Lichtsignalanlagen	-
MobiLind	Mobil auf der Linder Höhe (DLR-Projekt)	-
N	betrachtete Straßenabschnittslänge in Zellen	-
NDS	Naturalistic Driving Studies	-
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr	-
q	Verkehrsnachfrage bzw. Zuflusswahrscheinlichkeit	0 - 1
q _{krit}	kritische Verkehrsnachfrage	-
r	Rotphasendauer	Sekunden (s)
RDS-TMC	Radio Data System - Traffic Message Channel	-
REST	REpresentational State Transfer	-
s(g)	Anzahl an Fahrzeugen, die während der Grünphase aus einem (hinreichend langen) Rückstau abfließen. Das heißt s(g) berücksichtigt insbesondere auch die Anfahrtzeitverluste.	-
SHM	Shared Memory	-
SMS	Short Message Service	-
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol	-
SOAP	Simple Object Access Protocol	-
SQLEstimator	Simple Queue Length Estimator	-
TDP	Traffic Data Plattform	-
TS-BA	Standort - Berlin	-
TS-BS	Standort - Braunschweig	-
UDP	User Datagram Protokoll	-
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System	-
v _{max}	maximale Geschwindigkeit	Kilometer pro Stunde (km/h)

W3C	World Wide Web Consortium	-
WLAN	Wireless Local Area Network	-
WSDL	Web Service Description Language	-
xFCD	Extended Floating Car Data	-
XML	Extensible Markup Language	-
Δt	Zeitintervall	Sekunden (s)
Δt_{\min}	minimale zulässige Reisezeit	Sekunden (s)
ρ	Anteil von FCD Meldefahrzeugen im Gesamtverkehr	Prozent (%)

Glossar

a-priori-Gewichte

Gewichte, mit denen die Verkehrslagen mittels Zusatzinformationen gewichtet werden können (DPAnalyzer).

a-priori-Verteilung

Vektor aller a-priori-Gewichte für die Datenfusion (DPAnalyzer).

Bluetooth

Standard zum drahtlosen Datenaustausch über kleine Entfernungen.

CAN-Bus

Controller Area Network ist eine Fahrzeugkommunikationsplattform, welche den Austausch von Daten zwischen mehreren Segmenten des Fahrzeugs bereitstellt.

Car2X-Kommunikation

Ansatz zur Kommunikation des Fahrzeugs mit der Umgebung.

Datenfusion

Ist ein Vorgang, bei dem Daten aus unterschiedlichen Quellen zur Verbesserung der Datenqualität zusammengeführt werden.

Density Profile Analyzer

Ein neuartiger Ansatz zur Rückstaulängenschätzung mittels Floating Car Data.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in der Helmholtz-Gemeinschaft ist eine Gemeinschaft von Forschungsinstituten. Diese Arbeit findet an dem Institut für Verkehrssystemtechnik am Standort Berlin (Adlershof) statt.

Floating Car Data / Extended Floating Car Data

Positionsdaten der Meldefahrzeuge, die durch das Senden von weiteren Fahrzeugdaten ausgebreitet werden können.

Global Positioning System

Bezeichnet ein globales Satellitennavigationssystem.

GoogleEarth

Stellt die Erdoberfläche in einer virtuellen Welt dar. Dabei können viele standortabhängige Daten abgerufen werden.

Hochfrequente Floating Car Data

Als hochfrequent werden die FCD mit einem Meldeintervall von <5 Sekunden bezeichnet.

Java

Ist eine objektorientierte Programmiersprache zur Entwicklung von Anwendungen. Die Programmiersprache ist nur ein Teil der gesamten Java-Technologie.

Map-Matching

Vorgang zur Abbildung der Positionsdaten auf eine virtuelle Karte.

Markov-Ketten-Modell

Wird als ein stochastischer Prozess der aus mehreren Zuständen besteht bezeichnet. Der Hintergrund ist es, zufällige Änderungen der Zustände zu modellieren.

Maximum-Likelihood-Schätzung

Ist im Allgemeinen ein Schätzverfahren zur Lokalisierung des plausibelsten Wertes in einer Reihe von Daten.

Messkampagne

Vorgang zur Erhebung von spezifischen Daten.

Nagel-Schreckenberg-Modell

Verfahren zur Modellierung des Verkehrs durch Spezifikation eines Straßenabschnitts, des Zuflusses und Abflusses und der maximalen Geschwindigkeit. Die virtuellen Fahrzeuge werden in Zellen bewegt.

Representational State Transfer

Repräsentiert einen Entwicklungsweg für die Entwicklung von Webanwendungen. Dieser zeichnet sich durch die Verwendung des schon bestehenden HTTP-Protokolls aus.

Rückstaulänge

„Zu einem gegebenen Zeitpunkt t als gestaut gelten alle Fahrzeuge zwischen Lichtsignalanlage bzw. Haltelinie und dem (staubedingt) aktuell stehenden oder zuvor auf demselben Straßenabschnitt gestandenen Fahrzeug mit dem größten Abstand zur Lichtsignalanlage.“ (vgl. [30] S. 22) Dies ist die Definition, die während der Entwicklung des „DPAnalyzers“ berücksichtigt wurde, jedoch wird innerhalb dieser Arbeit die Rückstaulänge als: Die Entfernung eines Fahrzeugs von der Haltelinie das als letztes am Ende einer Rotphase bzw. Beginn einer Grünphase (staubedingt) zum Stehen kommt.

ServiceHub

Ist eine zentrale Anwendung für mehrere Webservices, die am Institut für Verkehrssystemtechnik des DLRs am Standort Berlin entwickelt wurde.

Simple Object Access Protocol

Ein Netzwerkprotokoll, das einen XML basierten Netzwerkdatabaustausch beschreibt und bereitstellt.

Simple Queue Length Estimator

Ein einfaches Verfahren zur Rückstaulängenschätzung mittels hochfrequenter Floating Car Data das im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde.

Stationäre Detektoren

Unbewegliche Detektoren zur Detektion der aktuellen Verkehrslage.

Taxi-FCD

Die Floating Car Data werden von der Taxizentrale erfasst. Die Taxis melden sich in den meisten Fällen im Intervall von >30 Sekunden.

TrafficDataPlatform

Ist eine Plattform zur Verarbeitung und Darstellung der Verkehrsdaten am Institut für Verkehrssystemtechnik des DLRs am Standort Berlin.

TrackingDataService

Ist ein im Rahmen dieser Arbeit entwickelter Dienst zum Empfang und Verarbeitung der fahrzeugbasierten Daten vom Webservice.

Trajektorie

Bezeichnet den Bewegungspfad eines Objekts (Fahrzeugs).

Verlustzeiten

Der zeitliche Unterschied zwischen der minimalen zulässigen Reisezeit und der betrachteten Reisezeit.

Webservice

Ein Webservice ist ein Online-Dienst, der für den Datenaustausch zwischen Maschinen bereitgestellt wurde.

WLAN

Wireless Local Area Network ist ein lokales drahtloses Netzwerk zum schnellen Datenaustausch.

World Wide Web Consortium

World Wide Web Consortium ist das Gremium, welches für die Entwicklung neuer Technologien für das WWW zuständig ist.

XML (Extensible Markup Language)

Ist ein Standard zur Darstellung von hierarchisch strukturierten Daten mit dem Ziel, die Daten für den Menschen als auch für den Rechner einfach lesbar darzustellen.

Zuflusswahrscheinlichkeit

Bezeichnet die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug in einen bestimmten Zeitraum in den Verkehr zufließt.

1. Einleitung

Die Einleitung soll einen Einblick in das Thema, welches im Rahmen dieser Arbeit erfasst wird, geben. Darüber hinaus soll die Motivation bzw. die Problemstellung vorgestellt werden. Des Weiteren wird die Zielstellung erläutert. Anschließend wird die Vorgehensweise bzw. der Aufbau der Arbeit kurz beschrieben.

1.1 Motivation

Eine hochqualitative Verkehrsinfrastruktur ist für eine Region ein großer Vorteil, der von großer Bedeutung für die Wettbewerbsstärke der Wirtschaft eines Landes ist. Daher werden u.A. auch in Deutschland große Investitionen in die Entwicklung der Verkehrsinfrastruktur getätigt (ab dem Jahr 2013 zusätzlich 750 Millionen Euro für Neu- und Ausbauprojekte der Bundesverkehrswege). (vgl. [3] S. 9) Eine gut ausgebaute Infrastruktur erspart volkswirtschaftliche Schäden. (vgl. [1] S. 13) Aufgrund der Steigerung der Anforderungen an die Verkehrsinfrastruktur muss auch die Leistungsfähigkeit angepasst werden. Weil die Leistung der Infrastruktur begrenzt ist, besteht die Möglichkeit des Einsatzes von Verkehrsinformationstechnologien zur Verbesserung der Verkehrslage. Trotz der hohen Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur sind große ökonomische Verluste nicht zu vermeiden. Allein im Jahr 2012 sind die Kosten von 7,8 Milliarden Euro errechnet worden. (vgl. [33]) Der größte Anteil der Verluste (4,8 Milliarden Euro) entsteht durch verschwendete Zeit. Die Gründe für die Verkehrsstörungen sind verschiedenartig, aber die Wesentlichen sind hohes Verkehrsaufkommen, Baustellen und Unfallstellen. (vgl. [4] S. 25) Diese Verkehrsstörungen können mit einem guten Verkehrsmanagement reduziert werden. Unter Verkehrsmanagement wird hierbei die Beeinflussung der Verkehrsabläufe durch die Erfassung der Verkehrszustände und der Verkehrsprognose verstanden. (vgl. [32]) Da in der Zukunft eine steigende Verkehrsnachfrage erwartet wird, steigt zusätzlich die Bedeutung des Verkehrsmanagements und der Verkehrsdatenerfassung. (vgl. [1] S. 25)

Diese Arbeit befasst sich mit der Optimierung der Rückstaulängenschätzung an lichtsignalisierten Knotenpunkten und verfolgt das Ziel, die Verkehrslage in Ballungsräumen zu verbessern. Mit den geschätzten Daten über die Rückstaulänge können die Lichtsignalanlagen besser gesteuert und ein Entscheidungsfaktor für das Verkehrsmanagement gewonnen werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden hochfrequente (Meldeintervall <5 Sekunden) und Taxi basierte Floating-Car-Datensätze als Input für die Schätzer benutzt. Die Taxi-FCD werden von der Taxizentrale abgefragt. In diesem Fall melden die Taxis in Abständen von 30 - 60 Sekunden ihre aktuelle Position zur Zentrale. Diese Meldungen werden in einer Datenbank gespeichert und dem Institut

für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt bereitgestellt. Mittels eines Map-Matching¹-Verfahrens werden die Positionen auf die Stadtkarte überführt, wodurch die Voraussetzung zur Rückstaulängenschätzung erfüllt wird. Durch den Einsatz dieses Verfahrens kann eine kostengünstige Lösung zur Bestimmung der Rückstaulängen vor LSA erbracht werden. Durch die Optimierung der Rückstaulängenschätzung vor Lichtsignalanlagen wird es möglich sein, bessere Entscheidungen im Verkehrsmanagement zu treffen wodurch eine Reduzierung der Reisezeiten und Schadstoffemissionen erzielt wird. (vgl. [4] S. 26))

1.2 Zielstellung

Das am Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR in Berlin entwickelte Verfahren „DPAnalyzer“ schätzt Rückstaulängen und Reisezeitverluste vor Lichtsignalanlagen durch den statistischen Vergleich von modellbasierten Verkehrsdichteprofilen mit der räumlichen Verteilung von Floating Car Daten (FCD, Daten von GPS-Meldefahrzeugen). Im Rahmen bisheriger Untersuchungen wurde das Verfahren systematisch mittels einer ausführlichen Simulationsstudie geprüft und anhand einiger weniger Tests mit Realdaten plausibilisiert. Eine systematische Validierung der Schätzergebnisse des Verfahrens mit real gemessenen Rückstaulängen fehlt jedoch bislang.

Am Standort Berlin existiert ferner eine zentrale Datenplattform für Verkehrsdaten (Traffic Data Platform (TDP)) und es wurde in den vergangenen Monaten ein Service Framework (Kommunikationsframework) entwickelt, welches es Softwaremodulen erlaubt, standardisiert Daten auszutauschen.

Am Standort Braunschweig des Instituts existiert eine fahrzeuginterne Laufzeitumgebung DOMINON, welche Fahrinformationen, die auf dem Can-Bus-System eines Messfahrzeugs verfügbar sind, verarbeitet und bereitstellt. In Braunschweig läuft ferner ein umfangreich angelegtes Projekt „Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (AIM)“², im Rahmen dessen zahlreiche Verkehrsdaten erhoben werden und unter anderem eine Forschungskreuzung definiert ist, die schrittweise mit immer mehr Sensorik zur Datenerhebung ausgestattet wird.

Im Zuge der Masterarbeit soll am Beispiel AIM-Braunschweig einerseits eine Schnittstelle zwischen der Laufzeitumgebung DOMINION und dem infrastrukturseitigen ServiceFramework/Kommunikationsframework bzw. der Datenplattform „TDP“

¹ Ein MapMatching Verfahren besteht aus der Abbildung von FCD Meldungen auf einer Karte die der realen Netzinfrastruktur entspricht. Ein Map-Matching Verfahren kann zur Korrektur der fehlerhaften Meldungen führen.

² AIM (Anwendungsplattform Intelligente Mobilität) ist eine Großforschungsanlage für Forschung und Entwicklung im Bereich intelligenter Mobilitätsdienste am Standort Braunschweig. [46]

implementiert werden. Hierdurch soll es möglich sein, hochgenaue Fahrinformationen, die auf dem Can-Bus eines Messfahrzeugs verfügbar sind, in die zentrale Datenplattform zu integrieren, um sie mit Bewegungsinformationen zusätzlicher externer Sensorik, z.B. GPS Logger, und anderen Verkehrsdaten schnell und einfach kombinieren zu können. Im Zuge der Implementierung sollen in Braunschweig Referenz-Messungen (fahrzeugintern mittels DOMINION und infrastrukturseitig mittels ServiceFramework) an der Forschungskreuzung sowie nach Möglichkeit an bis zu drei weiteren signalisierten Kreuzungspunkten durchgeführt werden, die auf die implementierte Schnittstelle zurückgreifen. Die dann zentral und standardisiert vorliegenden Daten bilden die Grundlage für den zweiten wesentlichen Arbeitsinhalt, eine datengetriebene Auswertung zwecks Verfahrensentwicklung/-verbesserung und -vergleich. Hierzu muss zunächst der vorhandene „DPAnalyzer“ für die gewählten Kreuzungspunkte eingerichtet und konfiguriert werden, um durch Datenanalyse den zeitlich-räumlichen Umgriff der Messfahrten und Analysen adäquat festlegen zu können. Die Ergebnisse der durchzuführenden Messungen fließen dann in die Optimierung des „DPAnalyzer“ ein.

Die erhobenen hochfrequente Fahrzeugdaten sollen in einem ersten Schritt systematisch ausgewertet und visualisiert werden. Auf Grundlage der Daten soll zunächst ein einfaches Verfahren zur Rückstaulängenbestimmung implementiert werden. Die hiermit ermittelten Rückstaulängen sollen dann als „Ground Truth“ zur Validierung / Kalibrierung des Verfahrens „DPAnalyzer“ genutzt werden. Ferner ist dann die Fragestellung zu untersuchen, inwieweit die hochfrequente Daten (ggf. „ausgedünnt“) als Eingangsdaten für den „DPAnalyzer“ die Ergebnisse hinsichtlich Genauigkeit und Aktualität verbessern können. Optional ist eine Verfeinerung dieser Sensitivitätsanalyse durch unterschiedliche Berücksichtigung der für den „DPAnalyzer“ nutzbaren sonstigen Eingangsdaten (Taxi-FCD von 160 Fahrzeugen).

1.3 Aufbau und Vorgehensweise

Die Arbeit besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil der Arbeit befasst sich mit den theoretischen Grundlagen der eingesetzten Technologien und Verfahren. Im zweiten Teil der Arbeit wird die praktische Umsetzung der Aufgabestellung beschrieben.

Theoretischer Teil der Arbeit

Zum theoretischen Teil der Arbeit gehören die Kapitel 2 und 3. Im Kapitel 2 wird die Rückstaulängenschätzung vor Lichtsignalanlagen näher betrachtet. Darüber hinaus wird die Funktionsweise des im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Verfahrens zur Rückstaulängenschätzung mittels FCD („DPAnalyzer“) erläutert. Weiterhin werden

herkömmliche Ansätze zur Rückstaulängenschätzung beschrieben. Im Kapitel 3 werden die Grundlagen und die Vorgehensweise zur Gewinnung von FCD erläutert. Darüber hinaus werden weitere Ansätze zur mobilen Verkehrslagenerfassung in Betrachtung genommen.

Praktischer Teil der Arbeit

Im praktischen Teil der Arbeit (Kapitel 4 und 5) wird die Umsetzung der Aufgaben beschrieben. Im Kapitel 4 werden alle Komponenten der Messkampagne veranschaulicht. Zum einen wird die entwickelte Schnittstelle zur Erhebung von Fahrzeug-, Radar- und Positionsdaten vorgestellt. Darüber hinaus wird die Planung und Durchführung der Messkampagne erörtert. Anschließend wird die Vorgehensweise bei der Auswertung der erfassten Kameradaten und hochfrequenten FCD erklärt. Das Kapitel 5 stellt die Analyse der durchgeführten Rückstaulängenschätzungen dar. Dabei ist es wichtig zu erwähnen, dass der „DPAnalyzer“ mit hochfrequenten- und Taxi-FCD getestet wurde. Des Weiteren wird das neue einfache Verfahren zur Rückstaulängenschätzung mittels hochfrequenter FCD vorgestellt und erläutert. Anschließend wird eine Schlussbetrachtung der Ergebnisse durchgeführt.

2. Rückstaulängenschätzung vor Lichtsignalanlagen

2.1 Verkehrsadaptive Lichtsignalanlagensteuerung

Wie in der Einleitung erwähnt, sind die negativen Auswirkungen des Rückstaus auf die Umwelt und die Ökonomie bedeutend. Die Steuerung des Verkehrs erfolgt durch unterschiedliche Verfahren. In diesem Sinne stehen die Lichtsignalanlagen als eines der wichtigsten Werkzeuge des Verkehrsmanagements, den Verkehr zu beeinflussen. Lichtsignalanlagen dienen in erster Linie der Sicherheit im Verkehr, indem diese das gefahrlose Queren von Straßen gewährleisten (vgl. [9] S.1, [24] S.6, [26] S.9). Diese Sicherheitsaspekte haben auch einen entscheidenden Nachteil, da der Verkehrsfluss unterbrochen wird. Dabei bildet sich bei Rotphasen ein Stau vor der Lichtsignalanlage, was unterschiedliche negative Auswirkungen, wie z.B. Umweltschaden verursachen kann.

Jede positive Beeinflussung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten (Kreuzungen) in Ballungsräumen ist von großer Bedeutung für die Umwelt, Ökonomie und den Menschen. Ein großer Teil der Verzögerungs- und Beschleunigungsvorgänge findet vor Lichtsignalanlagen statt, was zu einer Erhöhung von Emissionen, Kraftstoffverbrauch und Reisezeiten führt (vgl. [10] S. 2).

Die ersten vollautomatisierten Ansätze der verkehrsadaptiven Lichtsignalanlagensteuerung wurden mittels Induktivschleifen oder Infrarotdetektoren durchgeführt. Mit dem Begriff verkehrsadaptive Steuerung ist die Steuerung der Lichtsignalanlagen unter der Berücksichtigung der aktuellen Lage des Verkehrs gemeint. Dabei sammeln ein oder mehrere Rechner die Daten der Sensorik und werten diese aus. Die Sensorik teilt nur mit, ob sich ein Fahrzeug in dem Erfassungsbereich befindet oder nicht. Dies hat den Vorteil, dass der Hauptverkehrsfluss nur dann unterbrochen wird, wenn ein oder mehrere Fahrzeuge die Freigabe der Nebenrichtung anfordern. Darüber hinaus können bei fließendem Verkehr Zeitlücken zwischen Fahrzeugen gemessen werden. Es existieren zahlreiche Nachteile dieses Ansatzes. Einerseits muss viel Sensorik an den Kreuzungen verbaut werden, um das System optimal nutzen zu können, was zu hohen Kosten führt. (vgl. [23] S.1) Andererseits können diese Detektoren einige wichtige Kenngrößen nicht liefern, wie z.B. die Rückstaulänge oder die Wartezeit. Es besteht die Frage, inwiefern sich der Beobachtungshorizont dieser Sensorik mittels neuer Ansätze erweitern lässt (vgl. [9], S.1).

Die Lösung befindet sich in der heutzutage verfügbaren Satellitenortung und Mobilkommunikation. Diese Technologien bringen die Lichtsignalanlagensteuerung auf ein ganz neues Niveau (vgl. [9] S.1, [24] S.6). Ein neuer Lösungsansatz wird im Rahmen

dieser Masterarbeit betrachtet. Dieser Ansatz basiert auf FCD-Meldungen aus unterschiedlichen Quellen für die Ermittlung der durchschnittlichen Rückstaulängen an LSA. Diese Rückstaulängen werden aus historischen Daten erfasst und dienen nicht einer Echtzeit-Lichtsignalanlagensteuerung. Dies kann z.B. mittels C2I³-Kommunikation oder dem verlustzeitbasierten Ansatz (vgl. [31]) gewährleistet werden. Anbei wird der neue Ansatz mit den hochfrequenten Floating-Car-Daten getestet, um eine mögliche Erweiterung zur Bestimmung der aktuellen Rückstaulängen an LSA zu gewährleisten.

2.2 Rückstaulängenschätzung vor Lichtsignalanlagen

2.2.1 Motivation der Rückstaulängenschätzung vor Lichtsignalanlagen

Die Verkehrslagenerfassung an signalisierten Knotenpunkten ist ein sehr wichtiger Baustein zur Erhöhung der Qualität des Verkehrsablaufs in Ballungsräumen. (vgl. [16] S.1) Voraussetzung für eine Minimierung der Störungen im Verkehr vor LSA ist ein bekannter Verkehrszustand vor diesen LSA. Es existieren mehrere Verkehrskenngrößen, die den Zustand vor einer LSA beschreiben können wie z.B. die Zuflussrate oder Anzahl der Fahrzeuge, die jedoch keinen direkten Rückschluss auf die Länge des Rückstaus ergeben. Das Verkehrsmanagement hat unter anderem die Aufgabe der Optimierung der Lichtsignalanlagenschaltzeiten. Um diese zu optimieren, müssen bestimmte Verkehrskenngrößen bekannt sein. Eine sehr wichtige Kenngröße ist die Rückstaulänge, die mit unterschiedlichen Verfahren mehr oder weniger korrekt bestimmt werden kann. Einige der fundamentalen Verfahren zur Rückstaulängenschätzung werden in den nächsten Abschnitten erläutert.

2.2.2 Schätzverfahren mittels Floating Car Data von Thorsten Neumann - DPAnalyzer

2.2.2.1 Einführung

Der neuartige Ansatz zur Rückstaulängenschätzung basiert auf der Auswertung vorhandener Floating-Car-Daten (siehe Abschnitt 3.2). Die Idee ist dabei ein Verfahren zu entwickeln, das Taxi-FCD nutzt, um Rückstaulängen und weitere Werte zu liefern. Zugleich bietet der Ansatz eine flexible Datenfusionsschnittstelle⁴, die unterschiedliche Zusatzinformationen berücksichtigen kann. In dem Fall, dass keine Zusatzinformationen vorhanden sind, liefern die Floating-Car-Daten schon alleine eine flächendeckende Verkehrslagenerfassung. Im Vergleich zu dem Verfahren zur Rückstaulängenschätzung, die im Kapitel 2.2.3 erwähnt sind, gibt es bei diesem Verfahren keine Ober- bzw.

³ Car-To-Infrastructure-Kommunikation zwischen Fahrzeug und der Infrastruktur.

⁴ Datenfusion ist ein Prozess der Auswertung von Daten aus verschiedener Datenquellen. Innerhalb des „DPAnalyzers“ wird diese zur Verbesserung der Schätzungen durch die Berücksichtigung von weiteren Verkehrskenngrößen eingesetzt.

Untergrenzen bei der Detektion von Rückstaulängen. Das heißt, dass der Detektionsbereich flexibel ist und an spezifische Anforderungen angepasst werden kann. Darüber hinaus basiert das Verfahren auf historischen Daten und liefert daher keine Echtzeit-Rückstaulänge vor LSA. (vgl. [30] S.4) Mit anderen Worten, kann das Verfahren z.B. der langfristigen Analyse des Verkehrs vor der LSA dienen um mit diesen Informationen das Verkehrsmanagement zu unterstützen. Durch eine Koppelung des Verfahrens mit weiteren Verkehrserfassungssystemen könnte eine Echtzeit-Rückstaulängenschätzung möglicherweise verwirklicht werden.

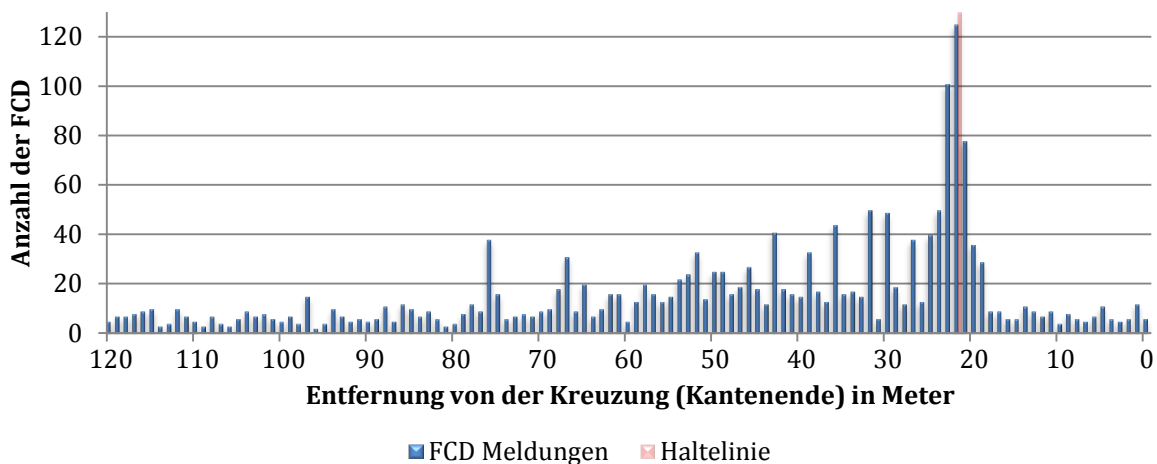


Diagramm 1. Auswertung von FCD Meldungen für die Forschungskreuzung (K047) in Braunschweig für Monat Mai (Abstände 1 Meter)

Das Verfahren betrachtet die räumliche Verteilung von FCD vor der LSA. Eine erhöhte Anzahl von FCD-Meldungen zu einem bestimmten Zeitpunkt deutet auf eine regelmäßige Staubildung hin, wie in dem Diagramm 1 erkennbar ist. Eine detaillierte Beschreibung des Prozesses der Gewinnung von FCD befindet sich im Kapitel 3. Ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell⁵ wird eingesetzt, um die statistische Beziehung zwischen den FCD und der Rückstaulänge herzustellen. Besondere Robustheit zeigt das Verfahren bei Fehlern oder Ungenauigkeiten, da diese nicht zwingend zu einem Fehler im Ergebnis führen. Dies geschieht weil die FCD und die modellbasierte Beschreibung möglicher Verkehrslagen gleichberechtigt abgeglichen werden (vgl. [30] S.5).

Anschließend wird die Rückstaulänge mittels einer (verallgemeinerten) Maximum-Likelihood-Schätzung⁶ ermittelt. In der Maximum-Likelihood-Schätzung können auch Zusatzinformationen in Form von Gewichtungen implementiert werden, was zu besseren Ergebnissen führen soll.

⁵ Mittels eines Verkehrsflussmodells können Aussagen über die Verkehrsdichte und den Verkehrsfluss getroffen werden. In groben Zügen kann es als Simulation der Auswirkungen von Änderungen im Verkehr definiert werden.

⁶ Maximum-Likelihood-Schätzung wird als statistisches Schätzverfahren definiert, das den Parameter auswählt, dessen Verteilung die Realisierung der beobachteten Daten am plausibelsten erscheinen lässt. [28]

Um die Verständlichkeit des Verfahrens zu gewährleisten wird in den folgenden Abschnitten das Verfahren detaillierter vorgestellt.

2.2.2.2 Funktionsweise des neuen Ansatzes

Angenommen eine Flotte von Meldefahrzeugen sendet ihre FCD in einem bestimmten Intervall Δt . Diese würden, wie zuvor erwähnt, eine Anhäufung vor der LSA aufweisen. Im Diagramm 2 wird verdeutlicht wie die Anhäufung vor einer LSA im Idealfall aussieht. Darüber hinaus zeigt das Diagramm wie die Belegungswahrscheinlichkeit von der Entfernung der FCD Meldung von der LSA abhängt.

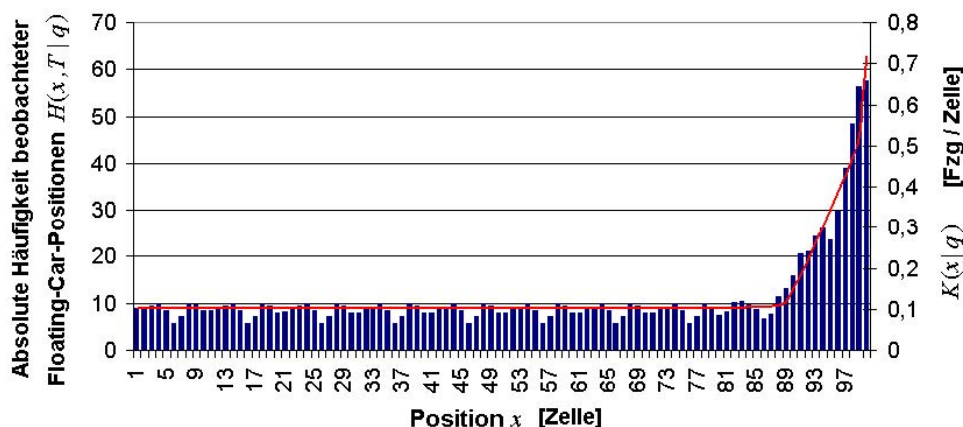


Diagramm 2. Belegungswahrscheinlichkeit(rot) im Vergleich zu der Häufung der FCD Meldungen

Quelle: [14]

Der eigentliche Algorithmus zur Rückstaulängenschätzung basiert dann auf einer modellbasierten Analyse des Verkehrsflusses vor Lichtsignalanlagen. In dem Verfahren, das in dieser Arbeit validiert und optimiert wurde, wird der Verkehrsfluss auf Grundlage des Nagel-Schreckenberg-Modells⁷ simuliert. Wichtig ist zu erwähnen, dass die Auswertung des Verkehrsflusses auch mit anderen Verfahren hergestellt werden kann. Bei diesem mikroskopischen Verkehrsflussmodell wird eine maximale Geschwindigkeit gewählt und der Straßenabschnitt in Zellen zerlegt. In der Abbildung 1 ist die Modellierung des Verkehrs in einer Einbahnstraße mit dem Einsatz vom Nagel-Schreckenberg-Modell dargestellt. In Neumanns Verfahren wird die Länge der Zellen als durchschnittliche effektive Länge⁸ eines Fahrzeugs bezeichnet und beträgt 7,5 Meter. Die Fahrzeuge bewegen sich von Zelle zu Zelle abhängig von der Entfernung zum vorausfahrenden Fahrzeug. Eine maximale Geschwindigkeit pro Zeitraum (Sekunde) wird gesetzt, welche in diesem Fall 2 Zellen beträgt. (vgl. [30])

⁷ Dieses Modell wird oft eingesetzt um die Staubildung zu simulieren. Dabei passt jedes Fahrzeug seine Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Entfernung zum vorausfahrenden Fahrzeug an.

⁸ Effektive Länge ist die Länge des Fahrzeugs und der durchschnittlicher Abstand von den vorausfahrenden Fahrzeugen zusammengerechnet. (vgl. [30] S.11)

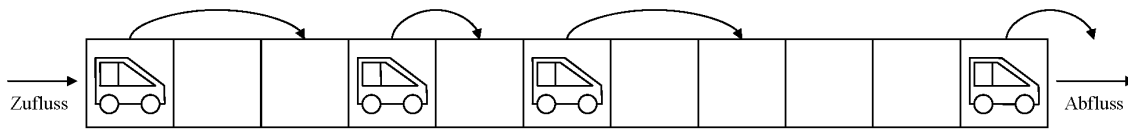
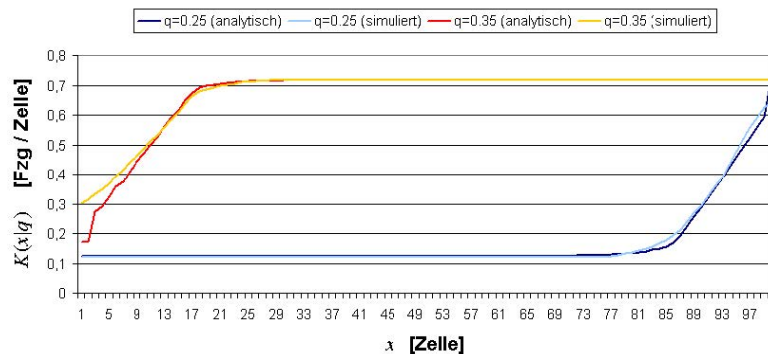


Abbildung 1. Nagel-Schreckenberg-Modell

Quelle: [30]

Dieses Modell dient der mathematischen Untersuchung der möglichen Verkehrszustände. Darauf aufbauend wird ein angepasstes endliches Markov-Ketten-Modell⁹ erstellt, welches den Zu- und Abfluss bilanziert. Das heißt, dass die Zustände der Zufluss- und Abflussmodellierung mittels dieses Modells vordefiniert sind. Als Zustände wird die aktuelle Position des Fahrzeugs im Modell bezeichnet. (vgl. [30]) Das Ergebnis der Vorbereitung für den Einsatz des eigentlichen Algorithmus ist ein stationäres Warteschlangenmodell mit der berechneten Unter- und Übersättigung (Diagramm 3).

Diagramm 3. Beispiel der Unter- und Übersättigung (q = Verkehrsnachfrage pro Zeiteinheit)

Quelle: [30]

An dieser Stelle wird die eigentliche Schätzung vorgenommen. Es werden zuerst die Verkehrsdichteprofile¹⁰ je Zufluss ermittelt. Diese beschreiben den Verlauf der lokalen Verkehrsdichte für den betrachteten Straßenabschnitt. Die Profile werden durch die durchschnittliche Belegung der Zellen und der Verkehrsnachfrage ermittelt. Die Anzahl der Profile ist dynamisch und das Ergebnis kann durch eine Erhöhung verfeinert werden.

Je Profil werden zugehörige Rückstaulängen berechnet. Nachdem die Dichteprofile bestimmt wurden, wird das Dichteprofil gewählt, das zu der Beobachtung am besten passt. Dieser Vorgang wird mit der so genannten Maximum-Likelihood-Schätzung durchgeführt. Die Maximum-Likelihood-Schätzung dient der Ermittlung des optimalen Verteilungsparameter bzw. der Verkehrsnachfrage. Anhand dessen kann im Anschluss

⁹ Markov-Ketten bilden eine spezielle Klasse stochastischer Prozesse und beschreiben z.B. die zeitliche Entwicklung von Systemzuständen, in diesem Fall der Rückstaulänge.

¹⁰ Verkehrsdichteprofile sind die Dichteprofile die in diesem Zusammenhang mittels Berücksichtigung unterschiedlicher Zuflusswahrscheinlichkeiten berechnet wurde sind.

eine dazugehörige Rückstaulänge erhalten werden. Genau an dieser Stelle besteht eine Datenfusionsschnittstelle, die es ermöglicht, weitere Verkehrsdaten in die Schätzung mit einzubeziehen, um das Ergebnis zu verbessern. Da die potentiellen Verkehrslagen (Dichtepprofile) über diese Zusatzinformationen gewichtet werden können, nennt man die auch a-priori-Gewichte und den Vektor aller Gewichte a-priori-Verteilung¹¹. Durch den Einsatz des Zusatzwissens können z.B. bestimmte Dichtepprofile oder Rückstaulängen bevorzugt werden. Als finaler Schritt der Schätzung wird die bereits berechnete zugehörige Rückstaulänge in Metern oder Zellen gefunden. Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens ist in der Dissertation von Thorsten Neumann zu finden. (vgl. [30])

2.2.2.3 Auswertung der bisherigen Simulations- und Testergebnissen

Das Verfahren wurde im Simulationsumfeld umfangreich getestet. Der größte Vorteil des Einsatzes eines Simulationsumfelds ist die sichergestellte Referenz auf die „realen“ bzw. simulierten Rückstaulängen, die mit dem geschätzten verglichen werden können. Dies ist in einem realen Umfeld oft nicht möglich, da meist keine Infrastruktur zur Ermittlung von Rückstaulängen vorhanden ist.

Damit der Verkehrsfluss überhaupt simuliert werden kann, werden bestimmte Parameter definiert, welche in der Tabelle 1 aufgelistet sind.

Tabelle 1. Liste der Parameter des DPAnalyzers

Quelle: (vgl. [30] S.48)

Parametername	Simulations Maßeinheit	Reale Maßeinheit
Länge des Straßenabschnitts	100 Zellen	~750 m
Freigabezeit	25 Zeitschritte	~25 sec
Sperrzeit	35 Zeitschritte	~35 sec
Maximalgeschwindigkeit	2 Zellen/Zeitschritt	~54 km/h

Die Rückstaulängenschätzung in der Simulation zeigt, dass die Ergebnisse in Abhängigkeit von Meldeintervall der FCD bzw. der Menge der FCD-Meldungen sehr schwanken. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass die Datenfusion eine bedeutungswerte Auswirkung auf die geschätzten Rückstaulängen hat. Dabei wurden Daten wie die ungefähr bekannte Verkehrsnachfrage als Zusatzinformation für die Datenfusion bereitgestellt. Die Auswirkung der Datenfusion ist in der Abbildung 2 deutlich zu sehen. Die Simulation hat gezeigt, dass der Schätzfehler mit dem Anteil von Meldefahrzeugen im Gesamtverkehr p stark zusammenhängt. In der Realität ist dieser

¹¹ Einbezug von Zusatzwissen (Verteilung) über ein Parameter bei der Schätzung des Parameters.

Anteil selten größer als 2% (vgl. [30] S.50). Der Schätzfehler zeigt, dass auch bei einer geringeren Meldefrequenz (~60 Sekunden) und Abdeckung (1.5%) bei dem Einsatz von Datenfusion sehr gute Ergebnisse erzielt werden.

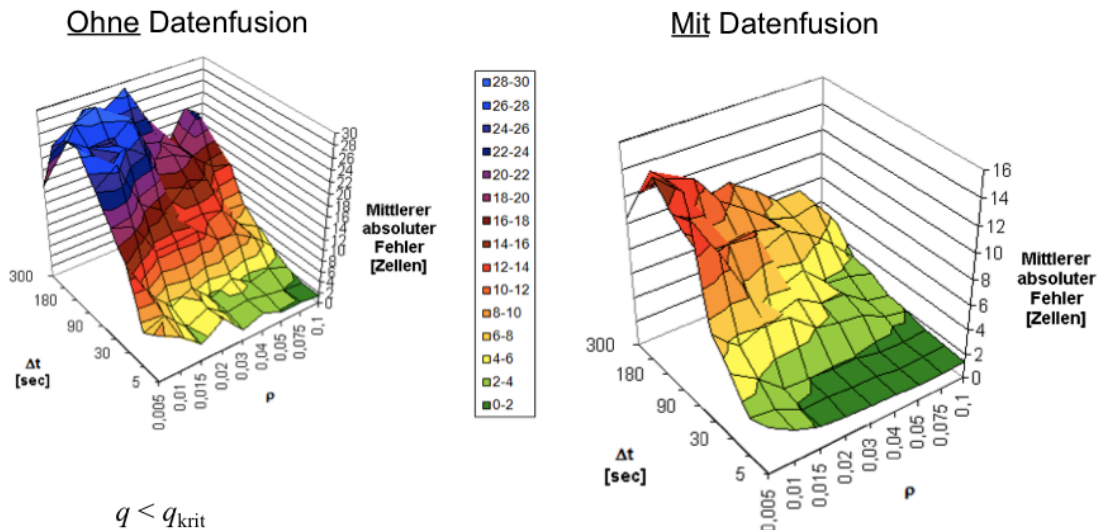


Abbildung 2. Schätzfehler ohne und mit Datenfusion in Abhängigkeit von der Abdeckung und Meldeintervall

Quelle: [30]

Das Verfahren wurde nicht nur in der Simulationsumgebung getestet, sondern auch im realen Umfeld. Dabei wurde eine Testkreuzung in Nürnberg als Referenzstrecke genommen und geschaut, inwieweit die ermittelten Rückstaulängen im Tagesgang plausible Verläufe ergaben, ohne sie jedoch explizit zu validieren (vgl. [30] S.77). Die Abdeckung bei dieser Messkampagne war kleiner als 0.2%. Das Ergebnis waren geringe Schätzfehler trotz potentieller Fehlerquellen und sehr geringen Abdeckung. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse wieder den großen Einfluss von Zusatzinformationen, die das Ergebnis deutlich verbessert haben.

In diesem Kapitel konnte festgestellt werden, dass dieses neuartige Verfahren umfangreich getestet wurde und die Ergebnisse ein hohes Potential aufwiesen. Dennoch besteht bis zu diesem Zeitpunkt letztlich keine Bestätigung der Schätzqualität im realen Umfeld, was im Rahmen dieser Arbeit noch umfangreich getestet wird. Das Testergebnis befindet sich im Kapitel 5.

2.2.2.4 Zukunftsaussichten des neuen Ansatzes

Im Rückblick auf die Schätzergebnisse kann festgestellt werden, dass dieses neuartige Verfahren ein großes Potential einer flächendeckenden Lösung zur verkehrsadaptiven LSA-Steuerung aufweist. Vor allem sprechen die ökonomischen Aspekte des Verfahrens dafür, dieses in Zukunft als eine kostengünstige Lösung des Verkehrs-Monitorings

einzusetzen. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist, dass die Daten, die zur Rückstaulängenschätzung verwendet werden, komplett anonym sind und deshalb datenschutzrechtlich unbedenklich sind.

Im Rahmen der Schätzung können auch weitere Verkehrskenngrößen berechnet werden wie z.B. Wartezeiten und Emissionen. Diese könnten dem Verkehrsmanagement ein neues Tool zur Qualitätsüberwachung und Planung gewährleisten. Darüber hinaus bietet das Verfahren eine gute Datenfusionsschnittstelle, um bessere Ergebnisse zu erzielen und weitere Kenngrößen berechnen zu können. Ob das Verfahren echtzeitbasiert Rückstaulängen schätzen kann, wird in Zukunft noch erforscht werden. In diesem Rahmen wird unter anderem auch die Koppelung von Car2X-Daten berücksichtigt.

2.2.3 Herkömmliche Ansätze zur Rückstaulängenschätzung vor Lichtsignalanlagen

2.2.3.1 Schätzverfahren mittels Induktivschleifendetektoren von Jürgen Mück

Das von Jürgen Mück entwickelte Verfahren benutzt die Schleifendetektoren, um die Belegung vor der Lichtsignalanlage zu bestimmen. Diese Detektoren sind häufig an wichtigen Kreuzungen vorhanden. Die Informationen, die aus diesem Verfahren abgeleitet werden können, sind Wartezeiten, Reisezeiten und Verkehrsstärken. Darüber hinaus lassen sich Störungen im Abfluss von Verkehr an einer Kreuzung erkennen. Im Allgemeinen ist die Kernidee des Verfahrens, Daten, wie z.B. maximale Rückstaulänge, zu ermitteln um ein Steuerungswerkzeug für das Verkehrsmanagement zu gewährleisten. (vgl. [12] S.1)

Das Verfahren beruht auf zwei wichtigen Kenngrößen, die die Schleifendetektoren liefern, die Füllzeit und die Belegzeit. Die Füllzeit ist die Zeit, die von dem Rotsignal bis zur Dauerbelegung eines Schleifendetektors vergeht. Die Belegzeit ist die Zeit die vergeht bis ein Detektor nach Beginn des Grünsignals wieder frei ist und liefert die Information in wie fern der Verkehr innerhalb der Kreuzung gestört ist. (vgl. [12] S.2)

Mücks Verfahren benutzt die vorhandene Infrastruktur (Schleifendetektoren), die sich 15 – 50 Meter von der Haltelinie entfernt befindet, um den Rückstau zu schätzen, der maximal eine 5 – 10 fache Entfernung des Sensoren-Haltelinie-Abstands beträgt. Das Verfahren ermittelt, ob das an der LSA haltende Fahrzeug aus freiem Verkehr angekommen ist oder ein Teil des alten Rückstaus bildet. Somit kann das Verfahren erkennen, dass sich die Fahrzeuge innerhalb eines Pulks bewegt haben, das aus einer bestimmten minimalen Anzahl von Fahrzeugen besteht. Kern des Verfahrens ist ein Erweiterter-Kalman-Filter¹².

¹² Satz von mathematischen Gleichungen. Wird benutzt um Fehlerhafte Daten von den Sensoren zu filtrieren.

Es beschreibt den Verkehrszustand durch Zufluss-Verkehrsstärke, mittlere Rückstaulänge und maximale Rückstaulänge.

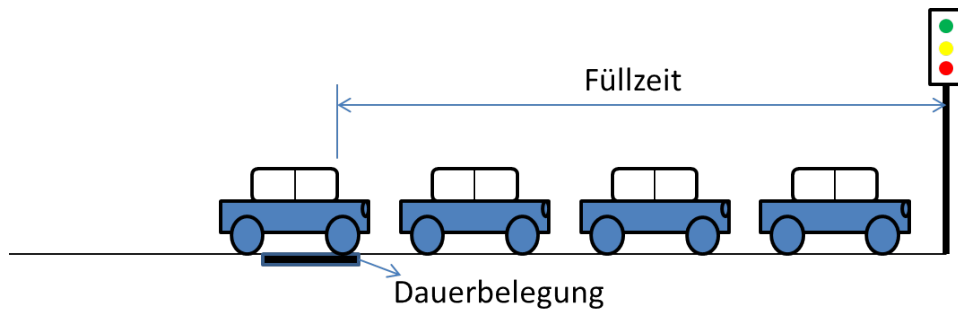


Abbildung 3. Beispiel der Belegung von einem Schleifendetektor

Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass die Infrastruktur an den meisten Kreuzungen, die eine größere Bedeutung im Verkehr haben, schon vorhanden ist und es stabil und verzögerungsfrei funktioniert. Weiterhin wurde und wird dieser Ansatz oft im realen Umfeld eingesetzt und getestet. Nachteil des Verfahrens ist, dass der Erfassungsbereich begrenzt ist. Das heißt, dass die Rückstaulängen die kleiner als die Entfernung des Sensors zur Haltelinie und größer als 5 – 10 fache dieser Entfernung sind, nicht erfasst werden können. Der Vorteil der neueren Methoden zur Rückstaulängenschätzung ist eine kostengünstigere und flächendeckendere Erfassung des Verkehrszustands vor der LSA.

2.2.3.2 Schätzverfahren mittels C2I-Daten von Christian Primer

Das Verfahren von Primer basiert sich auf der Car-to-Infrastructure-Methode, was eine relativ neue Methode der Verkehrsdatenerfassung ist. Dabei wird eine bidirektionale Verbindung zwischen der LSA und dem Fahrzeug gewährleistet. Das Fahrzeug sendet seine Positionsdaten und die aktuelle Geschwindigkeit und bekommt als Gegenleistung, Informationen über die verbleibende Zeit von der Rotphase, um dem Fahrer eine haltefreie Fahrt, falls möglich, zu gewährleisten. Die Kommunikation erfolgt über die WLAN-Technologie, welche der LSA ein Empfangsbereich von bis zu 300 Meter anbietet (vgl. [16] S.3).



Abbildung 4. TRAVOLUTION von AUDI das die C2I Kommunikation benutzt um dem Fahrer eine haltefreie Fahrt zu gewährleisten

Quelle: [44]

Um die Position des Fahrzeugs exakt zu berechnen, nutzt das Verfahren eine Funktion, die den Fahrstreifen bestimmt, in dem sich das Fahrzeug befindet. Hiermit kann die Distanz zwischen dem Fahrzeug und der Haltelinie errechnet werden. In Abbildung 5 wird die Distanzfunktion graphisch dargestellt.



Abbildung 5. Die Distanzfunktion($f_d(x)$) zur Bestimmung des Fahrstreifens und der Distanz des Fahrzeugs zur LSA

Quelle: [16]

Wie aus Abbildung 6 sichtbar ist, nutzt das Verfahren einen Detektor, wobei der Straßenabschnitt zwischen diesem Detektor und der Haltelinie den ersten Teil des Rückstaus definiert. Der zweite Teil des Rückstaus wird mittels des Gesetzes nach Little [11] geschätzt. Damit das Verfahren auch bei einem Mangel von kommunikationsfähigen Fahrzeugen innerhalb des Rückstaus funktioniert, wird ein stationärer Detektor vor der LSA eingebaut. Dabei wird wie bei dem Verfahren von Mück der Zeitpunkt der Dauerbelegung des Detektors betrachtet, um den Rückstau zu schätzen.

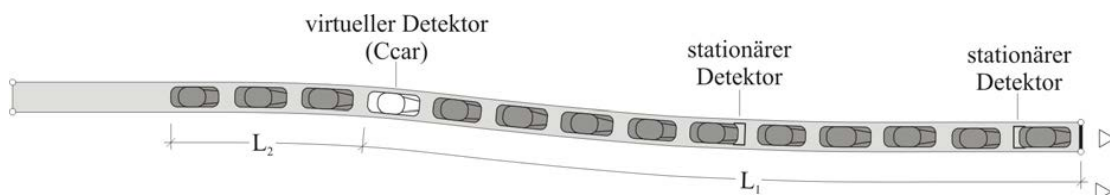


Abbildung 6. Der Ansatz für Rückstaulängenbestimmung von Primer

Quelle: [16]

Nachdem durch den stationären oder virtuellen Detektor die aktuelle Rückstaulänge bestimmt wurde, kann die Ankunftsrate der Fahrzeuge bestimmt werden. Mittels dieser Information wird dann für jeden Zeitpunkt während des Rotsignals eine Rückstaulänge geschätzt.

Dieses Verfahren ist in der Regel eine Erweiterung des Verfahrens von Mück. Das größte Defizit des Verfahrens ist der aktuelle geringe Anteil von WLAN-kommunikationsfähigen Fahrzeugen im Verkehr. Darüber hinaus müssen die Fahrer zustimmen, dass ihre Informationen zu diesem Zweck benutzt werden können. Trotzdem hat das Verfahren sehr gute Zukunftsaussichten.

2.2.3.3 Statistische Methode zur Rückstaulängenschätzung von Comert und Cetin

Das Verfahren von Comert und Cetin ist eine statistische Methode, die zur Echtzeit-Rückstaulängenschätzung benutzt werden kann. Weiterhin untersucht die Methode, inwieweit sich die Ergebnisse der Rückstaulängenschätzung verändern, in dem die Anzahl der Meldefahrzeuge in der Schlange variiert. Die Methode setzt voraus, dass eine bestimmte Anzahl von Meldefahrzeugen im Rückstau vor der LSA vorhanden ist und deren Position bekannt ist. In Abbildung 7 stellen die gefärbten Fahrzeuge diejenigen dar, die ihre Position zur LSA melden. Dieses Verfahren hat gewisse Zusammenhänge zum Verfahren von Primer. Der größte Unterschied ist, dass es keine Infrastruktur im Sinne von Detektoren im Kreuzungsbereich benötigt. Dieser Vorteil ist gleichermaßen der größte Nachteil, weil die Methode nicht funktioniert, sobald keine Meldefahrzeuge im Rückstau vorhanden sind.

Wie man aus der Abbildung 7 entnehmen kann, wird das Endergebnis der Rückstaulänge als Anzahl der Fahrzeuge präsentiert. Nachdem die Länge des Rückstaus bestimmt ist, wird sie mit der durchschnittlichen Fahrzeuglänge und dem durchschnittlichen Fahrzeugabstand geteilt. Das Verfahren betrachtet die Position des letzten Meldefahrzeugs und die Anzahl der Meldefahrzeuge im Rückstau, um die bedingte Verteilung der Rückstaulänge zu berechnen. Der wichtigste Parameter für die Berechnung ist die wahrscheinliche Anzahl der Fahrzeuge in der Warteschlange.

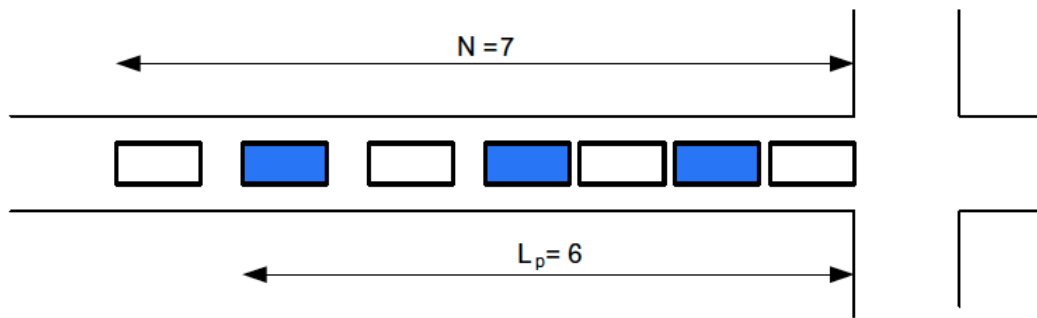


Abbildung 7. Schnappschuss von einer Kreuzung vor Ende der Rotphase

Quelle: [7]

Das Diagramm 4 zeigt, wie sich die Fehlerquote in der geschätzten Rückstaulänge verändert, in dem sich die Anzahl der Meldefahrzeuge ändert. Eine Fehlerquote von 0 Fahrzeuglängen ist erst dann erreicht, wenn alle Fahrzeuge in der Warteschlange, Meldefahrzeuge sind. Im Fall, dass keine Meldefahrzeuge in der Warteschlange vorhanden sind, ist die Fehlerquote mit bis zu 10 Fahrzeuglängen einzuschätzen. In Diagramm 4 wird ersichtlich, dass sich die Fehlerquote relativ niedrig ist, wenn die Anzahl der Meldefahrzeuge innerhalb eines Rückstaus über 0.4 beträgt.

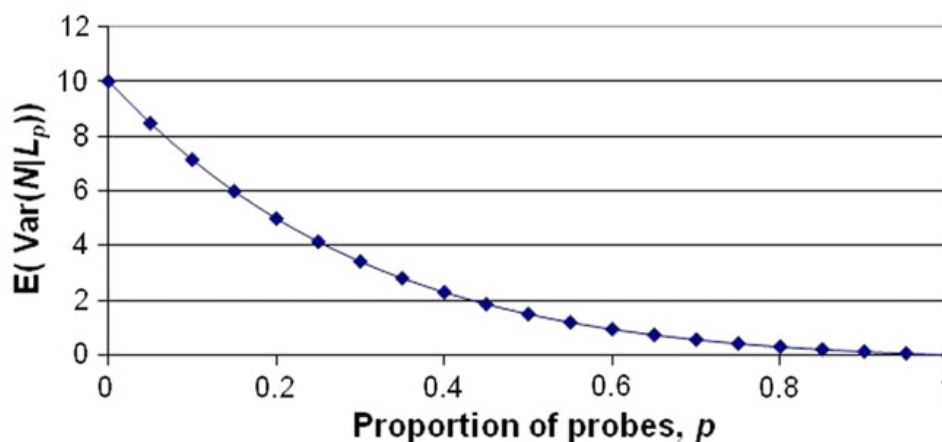


Diagramm 4. Variation des Fehlers im Vergleich zur Anzahl der Meldefahrzeuge in der Warteschlange

Quelle: [7]

Dieses Verfahren ist der erste Versuch, Daten von Meldefahrzeugen zur Bestimmung des Rückstaus vor LSA zu benutzen (vgl. [7], S.7). Das Verfahren beruht auf der Schätzung von der wahrscheinlichen Anzahl der Fahrzeuge in der Warteschlange. Durch die Berücksichtigung der realen Daten könnte das Verfahren vervollständigt und optimiert werden.

3. Verkehrslagenerfassung mittels Floating Car Data

3.1 Betrachtung der FCD als Mittel zur Verkehrslageerfassung

Eine flächendeckende Verkehrslagenerfassung war und ist für das Verkehrsmanagement sehr wichtig. Aufgrund der begrenzten Möglichkeit des Weiterausbaus des bestehenden Straßennetzes soll mit unterschiedlichen Verfahren der Verkehrslageerfassung die Kapazität der bestehenden Netze maximal ausgenutzt werden. Herkömmliche Systeme liefern eine lokale Verkehrslage, die mit stationären Detektoren erfasst wird. Lokale Verkehrsdaten sind im urbanen Verkehr oft unzureichend durch die unmögliche Nachvollziehbarkeit der Reisezeiten und Routen der Fahrzeuge. (vgl. [19] S.2, [20] S.7) Darüber hinaus werden aufgrund der Kosten die lokalen Detektoren nur auf den Hauptstraßen eingesetzt, was eine limitierte Erfassung mit sich führt. Angesichts dieser Nachteile wurden in den letzten Jahren neue Ansätze entwickelt und getestet. (vgl. [19] S1.) Als überzeugende Systeme haben sich GPS und Bluetooth/WLAN Datenerfassung gezeigt. (vgl. [20] S.7) Diese bieten eine Straßennetzweite Datenerfassung und die Messung von Reisezeiten/Reisegeschwindigkeiten. Die Daten der stationären Detektoren können mit Daten der flächendeckenden Ansätze fusioniert werden, wodurch Ergebnisse verbessert werden und sich neue Möglichkeiten ergeben. (vgl. [5] S.111) Als neue Möglichkeit ist die Berechnung neuer Verkehrskenngrößen gemeint wie z.B. Rückstaulängen die mittels stationärer Detektoren wegen des begrenzten Erfassungsbereichs nicht erfasst werden können, die für das Verkehrsmanagement von großer Bedeutung sind.

FCD ist ein GPS-basierter Ansatz, der Positionsdaten einer Fahrzeugflotte liefert. Die größten Vorteile sind die flächendeckende Erfassung und niedrige Kosten. Obwohl die Erfassung von FCD ein komplexer Vorgang ist, kann die bestehende Infrastruktur von beispielsweise Taxi-Zentralen genutzt werden. Der Ansatz ist attraktiv und kostengünstig, weil keine weiteren Hardwarekosten anfallen. Taxis melden ihre Positionen unabhängig von Verkehrsmanagementzwecken zur Taxizentrale die in einer Datenbank für weitere Auswertung gespeichert werden. Ein weiterer Vorteil der Erfassung von Taxi FCD sind die hohen Fahrleistungen von Taxis, die trotz einer geringen Abdeckung¹³ im Gesamtverkehr genügend Daten liefern können. (vgl. [30] S.73)

¹³ Zurzeit ist die Abdeckung im Gesamtverkehr ~0.5% bis 1.5%. (vgl. [30])

3.2 Vorgang der Erfassung von FCD am Beispiel DLR

Wie im letzten Abschnitt erläutert wurde, ist die Gewinnung von FCD ein komplexer Prozess. Zuerst muss eine Flotte von Fahrzeugen¹⁴ bestehen, die ihre Positionsdaten liefern. Dabei soll das Intervall der Meldungen spezifiziert werden. In diesem Beispiel wird eine Taxizentrale als Lieferant der Daten betrachtet. Für die Taxizentrale ist eine hohe Frequenz des Austauschs von Positionsmeldungen nicht notwendig. Deshalb teilen die Taxis wegen den anfallenden Kosten ihre Position meistens im Intervall von >30 Sekunden mit. Natürlich würde ein geringeres Intervall eine größere Menge von Daten und damit auch eine bessere Verkehrslageerfassung liefern. Dennoch liefern die Taxizentralen sehr wichtige und hochwertige Daten über die aktuellen und historischen Verkehrslagen.

Im vorgestellten Beispiel erfasst das Navigationsmodul des Taxifahrzeugs über das Global Positioning System zuerst dessen Position. Danach werden eine Fahrzeugidentifikationsnummer, ein Zeitstempel und eine Position über Funk an die Taxizentrale übertragen. Darüber hinaus können auch weitere Daten wie z.B. die aktuelle Geschwindigkeit versendet werden. (vgl. [30] S.73) Über eine standardisierte Schnittstelle zwischen der Taxizentrale und dem DLR werden die FCD übertragen. Diese Rohdaten werden in eine speziell für geobasierte Daten angepasste Datenbank geschrieben. Ohne weitere Verarbeitung sind die Daten nicht brauchbar. Deshalb wird das - im Abschnitt 3.2.2 noch detailliert beschriebene - Map-Matching-Verfahren eingesetzt, um die Positionsmeldungen auf eine virtuelle Karte zu referenzieren. Das Verfahren ermöglicht die Bestimmung der Verkehrslage, der Entfernung zwischen zwei Positionsmeldungen und die Darstellung der Daten. Zahlreiche Verkehrskenngrößen können aus diesen fertig gestellten FCD berechnet werden. Dabei gelten als sehr wichtig die Reisezeiten und durchschnittlichen Geschwindigkeiten. (vgl. [19], [6]) Im Rahmen dieser Arbeit werden weitere mögliche Kenngrößen vorgestellt wie z.B. Rückstaulängen. In der Abbildung 8 ist der Prozess der Gewinnung von FCD am Beispiel DLR graphisch dargestellt.

¹⁴ In diesen Beispiel werden die Taxi FCD benutzt.

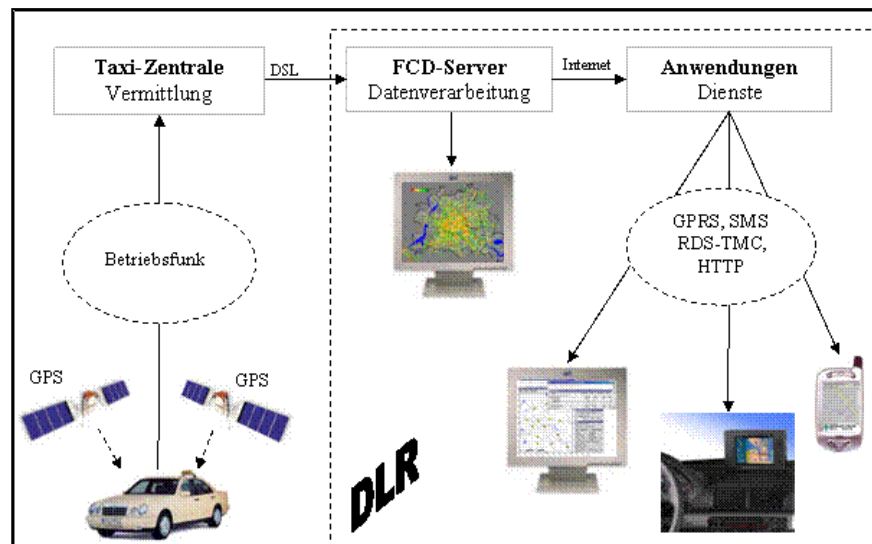


Abbildung 8. Aufbau des FCD Datenerfassungssystems von Taxi bis zur Verwendung, Beispiel DLR

Quelle: [45]

3.2.1 Ortung mittels Global Positioning System

Der Kern des FCD-Ansatzes ist die GPS-Ortung der Fahrzeuge. In diesem Abschnitt wird die Funktionsweise des GPS betrachtet sowie die auftretenden Ortungsfehler. Für mehr detaillierte Ausführungen wird auf [27] verwiesen.

Die GPS Ortung hat sich seit Anfang 90-er Jahre bezüglich der Genauigkeit und Verfügbarkeit deutlich entwickelt. Das GPS wird zur weltweiten Positionsbestimmung benutzt. Heutzutage ist die Nutzung von GPS ziemlich verbreitet, da die Entwicklung von mobilen Endgeräten mit einem GPS Empfänger es möglich gemacht hat, zu jedem Zeitpunkt und kostengünstig seine Position zu kennen. Den Hauptteil des Systems bilden mindestens 24 Navigationssatelliten, die um die Erde kreisen. (vgl. [27], [30] S. 92) Diese versenden ihre aktuelle Position und mittels Atomuhren gemessene Zeit 50 Mal pro Sekunde. (vgl. [21] S.6, [27] S.11) Der Empfänger muss, um die Position zu bestimmen, wenigstens Positionen von vier Satelliten empfangen weil bei einem Empfang von drei Satellitenpositionen zwei mögliche Empfängerpositionen auftauchen. Zur Ortsbestimmung des Empfängers soll zunächst der Abstand zwischen dem Empfänger und den Satelliten berechnet werden, was mit der einfachen Formel 3.1 berechnet werden kann.

$$\text{Abstand} = \text{Lichtgeschwindigkeit} \times \text{Signallaufzeit} \quad 3.1$$

Die Signallaufzeit ist die Differenz zwischen der Sendezeit und der Empfangszeit. Nachdem die Satellitenposition und Entfernung bekannt sind, kann die Position des Empfängers einfach bestimmt werden, da sich die vier Ellipsen genau in einem gemeinsamen Punkt, wie in der Abbildung 9 zu sehen ist, schneiden. Als Ellipse wird der

Signalumkreis eines Satelliten bezeichnet. In der Abbildung 9 sind diese genauer zu betrachten.

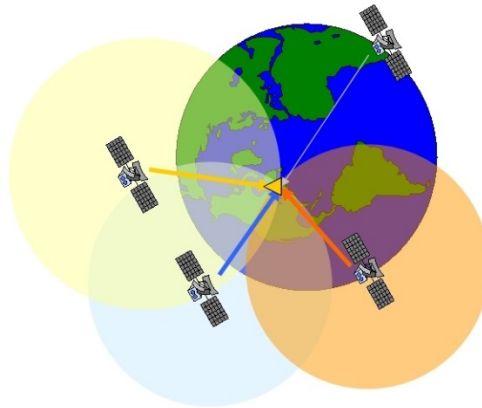


Abbildung 9. Ermittlung der aktuellen Empfängerposition mittels Satellitennavigation

Quelle: [43]

Es existieren mehrere mögliche Fehlerquellen bei der GPS-Ortung. Die bedeutsamsten sind Ionosphärenfehler, Mehrwegefehler, Empfängerfehler, geometriebedingte Fehler, Satellitenuhrfehler, Bahnparameterfehler und Troposphärenfehler. (vgl. [27] S. 188)

3.2.2 Map-Matching Verfahren

Wie schon erwähnt bringen rohe GPS-Daten keine Informationen über den Verkehr, wodurch keine Verkehrskenngrößen berechnet werden können. Eine sehr wichtige Kenngröße ist die Entfernung zwischen zwei Punkten, die ohne ein Map-Matching nicht berechnet werden kann, da ein großer Unterschied zwischen der Luftentfernung und der realen kartenbasierten Entfernung besteht. (vgl. [30] S.75) Deshalb werden die GPS-Daten auf eine virtuelle Karte¹⁵ projiziert. So kann ein Rückschluss gezogen werden, auf welcher Kante¹⁶ sich zu welchem Zeitpunkt ein oder mehrere Fahrzeuge aufhielten. Das Map-Matching-Verfahren spielt eine sehr wichtige Rolle in der Verkehrstelematik (z.B. in der Entwicklung von Intelligenten Transport Systemen¹⁷ [ITS]). (vgl. [17] S.312)

GPS-Daten sind aus verschiedenen Gründen nicht immer genau. Eine Zuordnung des GPS-Signals zu einer Kante auf der virtuellen Karte ist der wesentliche Teil des Map-Matching Verfahrens. Bei dem Verfahren besteht die Möglichkeit, die fehlerhaften Positionsdaten zu korrigieren und einer Kante zuzuordnen. Dies ist nicht trivial, da eine fehlerhafte Positionsmeldung im urbanen Straßennetz mehreren möglichen Kanten

¹⁵ Als virtuelle oder digitale Karte ist mathematisch gesehen die Abbildung des realen Straßennetzes im Sinne eines gerichteten Graphs gemeint. Dabei besteht der Graph wie üblich aus gerichteten Kanten und Knoten. Weitere Informationen können beinhaltet werden wie z.B. Geschwindigkeitsbegrenzung.

¹⁶ Eine Kante wird innerhalb einer virtuellen Karte als ein Teil des Graphen (Karte) der zwei Punkten (Knoten) verbindet verstanden.

¹⁷ ITS sind innovative Dienste für Transport und Verkehrsmanagement.

zugeordnet werden kann. Im Versuch ein Verfahren zu entwickeln, das die richtige Kante, Position an der Kante und Richtung berechnen kann, wurden in den letzten zwei Dekaden mindestens 35 Map-Matching Algorithmen entwickelt. (vgl. [17] S.313) Alle diese Algorithmen basieren auf unterschiedlichen Ansätzen wie z.B. topologischer oder geometrischer Ansatz. (vgl. [30] S.75) Jeder dieser Ansätze hat Vor- und Nachteile und eignet sich für bestimmte Anwendungsmöglichkeiten. (vgl. [17] S.313)

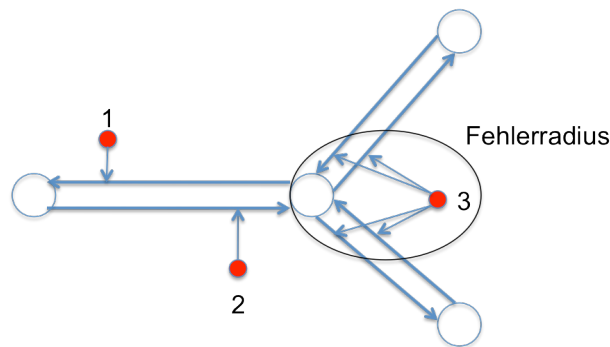


Abbildung 10. Das Map-Matching Problem

In der Abbildung 10 ist das Problem des Map-Matching-Verfahrens graphisch dargestellt. Die Position der GPS-Signale 1 und 2 kann einfach berechnet werden. Bei der Position 3 soll innerhalb des Algorithmus die richtige Position berechnet werden. Für jede Signalmeldung wird ein Fehlerradius bestimmt, der den Fehler des GPS-Signals berücksichtigt. Im nächsten Abschnitt wird das Beispiel des DLR verwendet, um einen möglichen Lösungsansatz zu erläutern.

Der Algorithmus sortiert zuerst die Positionsmeldungen einzelner Fahrzeuge nach der eindeutigen Fahrzeugidentifikationsnummer. Weiterhin werden Routen der einzelnen Fahrzeuge betrachtet. Dabei muss ein Fahrzeug mindestens zwei Meldungen gesendet haben, um die Trajektorien¹⁸ bilden zu können. (vgl. [30] S. 76) Das Ergebnis bildet eine Menge von mehreren möglichen Routen, die dieses Fahrzeug gefahren sein könnte. Für jede dieser möglichen Routen wird eine virtuelle Reisezeit berechnet. Aus diesen Reisezeiten kann anschließend die Wahrscheinlichste berechnet werden. Als die Wahrscheinlichste wird die Route bezeichnet, die mit den realen Reisezeiten am besten entspricht. Dieser Ansatz bietet eine genaue Zuordnung des Signals zu der richtigen Kante. Darüber hinaus wird sichergestellt, dass die Fahrtrichtung bei bidirektionalen Straßen ohne Fehler bestimmt wird.

Map-Matching-Algorithmen haben sich in den letzten Jahren verbessert, d.h. dass die Zuordnung immer genauer geworden ist. Dennoch bestehen Probleme beim Map-

¹⁸ Eine Trajektorie ist der Bewegungspfad eines Objekts.

Matching wie z.B. keine Kanten und Knoten innerhalb des Fehleradius oder falsche Fahrtrichtungsbestimmung. Die Notwendigkeit für viele Unternehmen ein Map-Matching-Verfahren zu benutzen garantiert eine Optimierung der bestehenden Algorithmen in der Zukunft. (vgl. [17] S.326) Mehr Informationen über Algorithmen und Weiterentwicklungspotenzial sind in [17] zu finden.

3.3 Extended Floating Car Data (xFCD)

Heutzutage wird eine große Menge von Daten in modernen Fahrzeugen erfasst. Innovative Fahrzeugsysteme benötigen diese Daten, um unterschiedliche Warnungen oder Informationen an den Fahrer weiterzuleiten. Darüber hinaus können automatische Einstellungen des Fahrzeugs den aktuellen Konditionen angepasst werden. Diese Daten werden vom Bussystem des Fahrzeugs abgefragt. In letzter Zeit haben diese Daten an Bedeutung für das Verkehrsmanagement gewonnen, da eine präzisere Verkehrslagenerfassung als mit herkömmlichen FCD gewährleistet werden kann. Wenn die herkömmlichen FCD mit diesen fahrzeugspezifischen Daten fusioniert werden, bekommt man sogenannte Extended Floating Car Data. Das xFCD-Konzept wurde von der Firma BMW seit 1997 erforscht und entwickelt. (vgl. [2] S.2) Dieses Konzept hat sich in den letzten Jahren aufgrund der ausführlichen Informationen, die es über die Verkehrslage und Fahrzeugumgebung liefert, in der Industrie und Forschung verbreitet. (vgl. [3], [34])

Daten von besonderer Bedeutung für die Verkehrslageerfassung (vgl. [8] S.4):

- Windschutzscheibenwischer oder Regensensor
- Externes Thermometer oder Klimaanlage
- Fahrzeuglichtsystem
- Warnsysteme
- Fahrdynamiksensoren
- Fahrerassistenzsysteme

Die Einsatzmöglichkeiten des xFCD sind vielseitig. Im Gegensatz zu herkömmlichen FCD können genauere und diverse Verkehrsinformationen erfasst werden. Darüber hinaus helfen die Fahrzeugdaten Gefahren wie z.B. Glatteis mittels Daten von ABS- und ESP-Systemen zu erkennen, in welchem Fall andere Verkehrsteilnehmer gewarnt werden können. Für viele innovative Forschungsprojekte sind diese Daten zur Erhöhung der Sicherheit und Qualität im Verkehr von großer Bedeutung.

3.4 Weitere Ansätze zur mobilen Verkehrslageerfassung

Neben dem zuvor erläuterten Taxi-FCD-Ansatz zur Verkehrslageerfassung bestehen weitere Ansätze, die ein ähnliches Konzept haben. Die Qualität der gewonnenen Daten von Taxi-FCD kann durch Fusion mit den durch andere Ansätze gewonnenen Daten erhöht werden. In den nächsten Abschnitten werden weitere Verfahren vorgestellt und kurz erläutert.

ÖPNV-FCD

Einer der weiteren Ansätze ist die Erfassung von Floating Car Daten des öffentlichen Verkehrs (Busse). Da die ÖV-Fahrzeuge eine begrenzte Strecke fahren, ist die Abdeckung nicht hoch. Deshalb können diese Daten nur eine Ergänzung zu anderen Verkehrsinformationen sein. Durch die Erfassung von Daten vor Lichtsignalanlagen kann ein Rückschluss auf den Verkehrszustand gezogen werden. (vgl. [23])

Floating Phone Data (FPD)

Die mobilfunkgestützte Verkehrsdatenerfassung wurde wegen der niedrigen Erhebungskosten in den letzten Jahren eingesetzt. Die Mobilfunkgeräte senden ihre Position in diesem Fall über die Mobilfunkstation. Der Vorteil ist, dass nur die übliche Kommunikation zwischen Basisstation und den Mobilfunkstationen für die Erfassung benutzt wird. Das Mobilfunkgerät wird an den Mobilfunkstationen angemeldet und teilt damit seine Empfangstärke mit. Je mehr die Teilnehmer telefonieren, desto besser ist die Qualität der Daten. Das Empfangsgebiet einer Mobilfunkstation wird in Zellen unterteilt. Damit kann bestimmt werden, in welcher Zelle sich das Fahrzeug bewegt. Das Verfahren wird ähnlich herkömmlichen FCD ausgewertet, liefert jedoch ungenauere Ergebnisse, da FCD eine GPS-Positionierung verwendet. Die FPD eignen sich zur Bestimmung des Verkehrsflusses an Fernstraßen. Nichtsdestotrotz liefern die FPD eine gute und kostengünstige Ergänzung zur FCD-Verkehrslageerfassung. (vgl. [18])

4. Planung und Realisierung der Messkampagne

4.1 Erwartungen von der Messkampagne

Das Ziel der Messkampagne ist die Erfassung von hochfrequenten FCD¹⁹ an vordefinierten Knotenpunkten in Braunschweig. Darüber hinaus wird die aktuelle Verkehrslage an den jeweiligen Kreuzungen mittels Kamera erfasst. Jede Messkampagne ist eine große Herausforderung, da das Ergebnis von vielen Faktoren abhängt. Die Erwartungen waren aufgrund des großen Interesses mehrerer Abteilungen des Instituts für Verkehrssystemtechnik des DLR hoch. Wie im Abschnitt 4.3 detailliert erläutert wird, war die Planung der Messkampagne umfangreich. Es wurde sich das Ziel gesetzt, 5 Tage lang mehrere Testkreuzungen, jeweils eine pro Tag, zu überwachen und Messungen durchzuführen. Der Messzeitraum ist vom Tag der Messung abhängig, da am Wochenende ein anderes Verkehrsverhalten zu erwarten ist. Die Videoerfassung erfolgt über einen 13m hohen Mast, der innerhalb eines DLR-Messfahrzeuges eingebaut ist (Abbildung 24). Damit kann ein breiter Winkel zur Videoerfassung ohne Störung unterschiedlicher Gegenstände vor der Kamera gewährleistet werden. Weiterhin wird ein zusätzliches Fahrzeug zur Erhebung von hochfrequenten FCD mit einer Plattform zur Datenerfassung ausgestattet. Es war zunächst geplant, dass die hochfrequenten FCD und weitere erfasste Daten über die Webservice-Schnittstelle, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt werden sollte, übertragen werden, jedoch wurde die Entwicklung der Benutzer-Seite verschoben, so dass eine Alternative für die Datenerfassung gefunden wurde (siehe NDS-Plattform, Abschnitt 4.3.3).

Mit Hilfe der Daten, die während der Messkampagne erfasst wurden, sollen zwei Rückstaulängenschätzer (siehe 2.2.2 und 5.1) mit hochfrequenten FCD validiert und gegebenenfalls optimiert werden. Die FCD werden in den Algorithmus des Rückstaulängenschätzers einfließen, um die geschätzte durchschnittliche Rückstaulänge für einen bestimmten Zeitraum zu liefern. Nachdem durch das Videoerfassungsmaterial die realen Rückstaulängen gegeben sind, werden diese mit dem geschätzten verglichen. Hiermit können die Verfahren zur Rückstaulängenschätzung ausführlich im realen Umfeld getestet werden und falls erforderlich optimiert werden. Im Anschluss werden die geschätzten Rückstaulängen des „DPAnalyzers“ und „SQLEstimators“ (für Details siehe Abschnitt 5.1) verglichen, um das Potenzial der Verfahren zu analysieren und bewerten.

Die Schnittstelle und die Daten, die während dieser Messkampagne erhoben werden, sind nicht nur für diese Arbeit von Bedeutung. In aktuellen und zukünftigen Projekten des DLR sollen diese Messdaten und die entwickelte Schnittstelle (siehe 4.2) eingesetzt werden,

¹⁹ Mit hochfrequent ist der Intervall der Meldungen gemeint, d.h. in welchen Intervall die aktuelle Position erfasst wird.

um unterschiedliche Algorithmen und Verfahren zur Ermittlung des Verkehrszustands im realen Umfeld zu testen. Darüber hinaus werden innerhalb der NDS-Plattform zur Erfassung von hochfrequenten FCD auch Daten über das Fahrerverhalten mittels Kameraüberwachung innerhalb des Fahrzeugs erhoben. Hierdurch können innovative Fahrerassistenzsysteme entwickelt werden, um die Sicherheit im Verkehr durch die Untersuchung des Fahrerverhaltens zu erhöhen.

4.2 Entwicklung der Schnittstelle zwischen DOMINION und TDP Service Framework

4.2.1 Erläuterung der bestehenden Systeme

In diesem Kapitel werden die Systeme DOMINION, das am Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR am Standort Braunschweig entwickelt wurde, und das TDP Service Framework, welches am Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR am Standort Berlin entwickelt wurde, erläutert. Dabei wird grob analysiert, wozu diese Systeme benutzt werden und welche Vorteile diese Schnittstelle für das Institut für Verkehrssystemtechnik hat.

DOMINION ist eine Plattform für die Entwicklung und Erprobung von ADAS²⁰. Die Plattform besteht aus Teilkomponenten wie verschiedene Serviceleistungen, standardisierte Schnittstellen, Datenbankanbindung, Laufzeitumgebung und Visualisierungskomponente. Aus Entwicklersicht wird DOMINION als Applikation bzw. verteiltes System verstanden. Dabei besteht jede Teilkomponente aus verschiedenen Applikationen die über Shared-Memory (SHM) miteinander kommunizieren. Im Netzwerk findet die Kommunikation via UDP-Broadcasting statt. Der Manager-Server ist für die Verwaltung der Kommunikation zuständig.

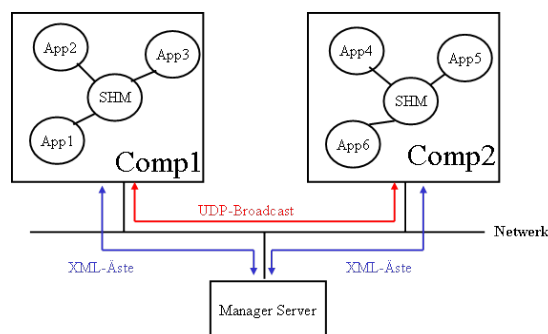


Abbildung 11. DOMINION Funktionsweise

Quelle: [49]

²⁰ Advanced Driver Assistance System – Vorgeschrittene Systeme die den Fahrer während der Fahrt unterstützen, so genannte Fahrerassistenzsysteme.

Das TDP Service Framework ist eine Kommunikationsplattform, die für den Austausch großer Datenmengen standardisiert wurde. Dabei werden Nachrichten zwischen dem Client und dem ServiceProvider, wie in der Abbildung 12 graphisch veranschaulicht wird, standardisiert ausgetauscht. Die Nachrichten werden mittels ActiveMQ von Apache in JSON Format umgewandelt und ausgetauscht. Dabei versendet der NotificationSender und der NotificationReceiver empfängt die JSON Nachricht. Die Nachrichten bestehen aus einem TDPMessage-Objekt (siehe 4.2.4.4).

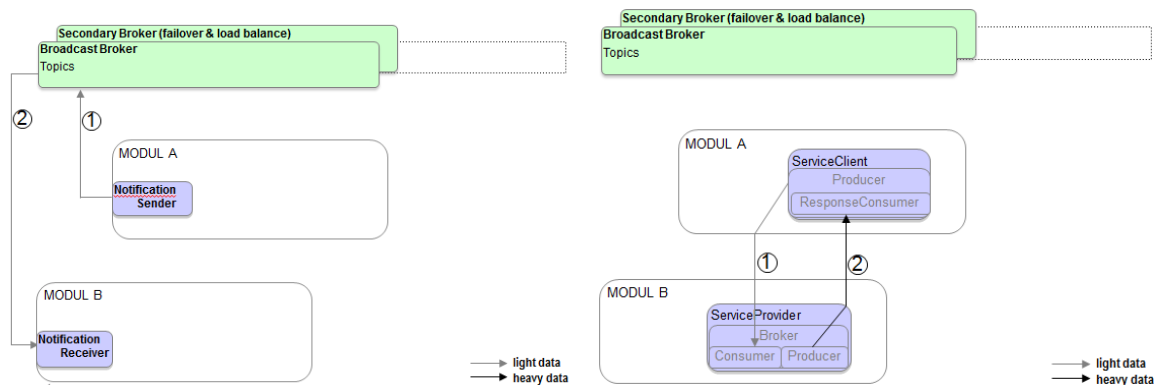


Abbildung 12. TDP ServiceFramework – Kommunikation

Quelle: [49]

Diese Schnittstelle soll ein großer Schritt zu weiteren Forschungsprojekten des DLR sein, da diese eine Möglichkeit bietet, Fahrzeug-, Positions- und Fahrerverhaltensdaten am Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR am Standort Berlin in Echtzeit zu empfangen. Diese können anschließend so verarbeitet werden, um die Sicherheit, Qualität und Erfassung der Verkehrslage zu erhöhen.

4.2.2 Anforderungen an die Schnittstelle

Die Anforderungen, die diese Schnittstelle erfüllen soll, wurden intern zwischen den Mitarbeitern der beiden DLR-Standorte besprochen. Dabei ist die Hauptidee, die Echtzeit-Daten von der fahrzeugbasierten Datenplattform (DOMINION) in Braunschweig den Mitarbeitern am Institut für Verkehrssystemtechnik in Berlin in Echtzeit zur Verfügung zu stellen. Die CAN-, Radar- und Positionsdaten werden mit den Fahrzeugen der DLR-Fahrzeugflotte, die für die Forschungszwecke angepasst sind, erfasst. In Tabelle 2 sind die Daten, die über die entwickelte Schnittstelle übermittelt werden sollen, aufgelistet.

Tabelle 2. Übersicht der Daten die über die Schnittstelle übertragen werden

Quelle	Übertragungsdaten	Format	Einheit
Navigation	Breitengrad	double	Grad
	Längengrad	double	Grad
	GPS Zeitstempel	string	s
	Genauigkeit der Position	float	m
	Geschwindigkeit	float	m/s
Fahrzeug CAN	Lenkgeschwindigkeit	float	rad/s
	Lenkwinkel	float	rad
	Beschleunigung	float	m/s
	Höhe	float	m
	Richtung	float	Grad
	Bremsdruck	float	Bar
	Scheibenwischer(an/aus)	boolean	-
	Licht(an/aus)	boolean	-
	Warnblinker(an/aus)	boolean	-
	ABS und ESP(an/aus)	boolean	-
Radar	Entfernung des voraus fahrenden Fahrzeugs	float	m
	Geschwindigkeit des voraus fahrenden Fahrzeugs	float	m/s

Mit Berücksichtigung des hochfrequenten Meldeintervalls kann aus der Tabelle 2 entnommen werden, dass eine große Menge von Daten übermittelt werden soll. Dabei ist die Liste erweiterbar und wird in der näheren Zukunft um Bluetooth- und WLAN-Daten erweitert. Damit die Echtzeit-Datenübertragung möglich ist, sollte eine Schnittstelle implementiert werden, die von der DOMINION-Plattform ansprechbar ist. Diese muss bestimmte Anforderungen erfüllen, die in der Tabelle 3 aufgelistet und gewichtet dargestellt sind.

Aufgrund der spezifischen Anforderung, dass die bestehenden Systeme des DLR berücksichtigt werden sollen, wird die Schnittstelle innerhalb des ServiceHubs (siehe 4.2.4.1) implementiert. Der ServiceHub implementiert mehrere Webservice, die auf SOAP beruhen. Die Grundlagen dieses Netzwerkprotokolls werden im nächsten Abschnitt erläutert.

Tabelle 3. Webserviceschnittstellenanforderungstabelle

Anforderung ID	Beschreibung	Gewichtung
A.1	Große Menge von Daten müssen in einen schnellen Intervall übertragen werden können	Muss
A.2	Die Schnittstelle soll sich möglichst gut an die bestehende Systeme anpassen	Muss
A.3	Empfangene Daten müssen in die AIM Datenbank geschrieben werden	Muss
A.4	Login für Benutzer	Muss
A.5	Daten müssen validiert werden d.h. ohne Positionsdaten und Zeitstempel sind die Daten nutzlos da kein Rückschluss auf die Trajektorie gemacht werden kann	Muss
A.6	Bei einem Verbindungsabbruch sollen die Daten beim Benutzer lokal gespeichert werden	Muss
A.7	Es soll möglich sein mehrere Datensätze auf einmal zu empfangen (bei Verbindungsabbruch)	Muss
A.8	Erweiterbarkeit	Muss

4.2.3 Grundlagen SOAP

Der Webservice wurde, wie zuvor erwähnt, als ein SOAP-Webservice entwickelt, da dieses Netzwerkprotokoll in dem ServiceHub benutzt wird und es als eine Anforderung definiert wurde (A.2). In diesem Abschnitt wird das SOAP-Netzwerkprotokoll erläutert und die Vor- und Nachteile im Vergleich zu anderen Lösungsansatz (REST) erläutert.

SOAP steht für „Simple Object Access Protocol“ und ist ein Netzwerkprotokoll, das den Datenaustausch zwischen Systemen über das Internet ermöglicht. SOAP ist XML-basiert und beruht in den meisten Fällen auf dem bestehenden HTTP²¹ Protokoll. (vgl. [35]) Das World Wide Web Consortium²² (W3C) hat SOAP empfohlen und definiert es als eine Kommunikation zwischen zwei Maschinen über das Internet. (vgl. [36])

Aufbau einer SOAP-Nachricht

Eine SOAP-Nachricht ist eine standardisierte XML-basierte Nachricht, die von einem Sender zu einem Empfänger gesendet wird. Diese Kommunikation reicht von einer

²¹ Hypertext Transfer Protocol – Netzwerkprotokoll zur Übertragung von Daten über ein Netzwerk dient.

²² World Wide Web Consortium ist das Gremium welches für die Entwicklung neuer Technologien für das WWW zuständig ist.

einfachen Kommunikation bis zu komplexen Interaktionen zwischen Applikationen. Die SOAP-Nachricht enthält einen optionalen Header und ein Body. Der Header erfasst unterschiedliche Informationen über die Nachricht, die inhaltlich nicht in die Nachricht passen. Der Body enthält die Informationen, die zum Webservice oder zum Benutzer gesendet werden. Der Tag Envelope (env:Envelope) ist praktisch der virtuelle Briefumschlag und beinhaltet den Header und/oder den Body.

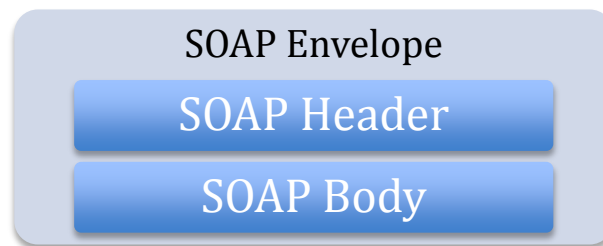


Abbildung 13. Aufbau einer SOAP Nachricht

SOAP-Charakteristiken

Das SOAP-Netzwerkprotokoll hat drei wichtige Charakteristiken (vgl. [36]):

- Erweiterbarkeit: kann um ein Webservice Routing oder eine Sicherheitskomponente erweitert werden
- Neutralität: ist mit Protokollen wie z.B. HTTP-Protokoll, SMTP oder JMS kompatibel
- Unabhängigkeit: von der Programmiersprache

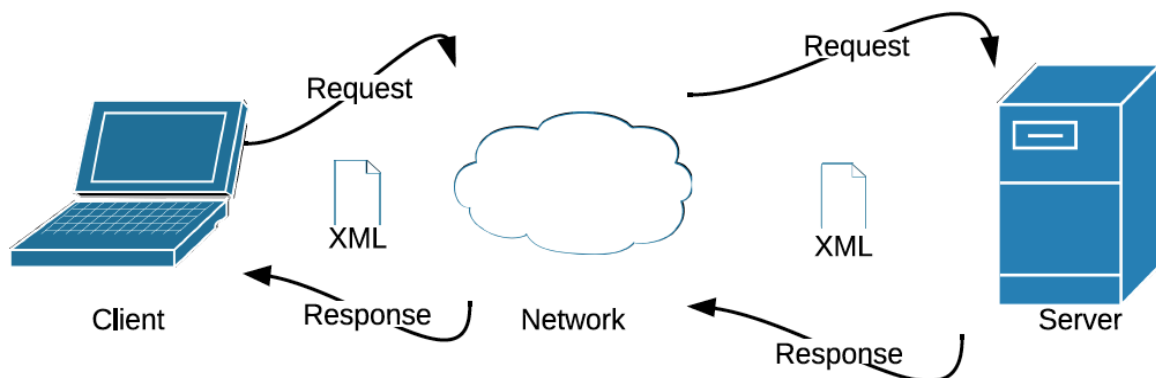


Abbildung 14. SOAP Kommunikation - Requests und Responses Beispiel

Web Service Description Language

Bei dem SOAP-Protokoll wird der Service über eine WSDL²³ Datei beschrieben. Um die Umsetzung des Webservices zu verdeutlichen, wird anschließend die WSDL-

²³ Web Services Description Language ist eine XML-basierte Webservicebeschreibungssprache.

Beschreibungssprache kurz erläutert. Durch folgende Elemente wird innerhalb einer WSDL-Datei ein Webservice beschrieben:

- Type: Container für die Datendefinition
- Message: abstrakte Definition der Daten, die übermittelt werden
- Port Type: eine abstrakte Menge von Operationen, die durch „endpoints“²⁴ unterstützt sind
- Binding: Protokoll und ein konkretes Datenformat, das durch ein Port-Typ unterstützt ist
- Port: einzelner „endpoint“ definiert durch die Netzwerkadresse und einem Binding
- Service: Sammlung von verwandten „endpoints“

Um ein ausführlicheres Verständnis über die WSDL zu bekommen, wird auf die Webseite des World Wide Web Konsortiums [39] verwiesen.

SOAP Nachteile und Vorteile im Vergleich zu REST

In diesem Abschnitt werden die Vor- und Nachteile des SOAP-Kommunikationsprotokolls erläutert. Obwohl in dieser Arbeit das Protokoll wegen der Anforderungen an die Schnittstelle schon vordefiniert ist, wird an dieser Stelle erläutert, wieso SOAP vorteilhaft gegenüber REST bei solchen Diensten ist.

Es existiert in der Webserviceentwicklung eine Alternative zum SOAP die als REST bezeichnet wird. Das REST steht für „REpresentational State Transfer“ und bezeichnet eine statuslose Kommunikation über HTTP zwischen Benutzer und Server, die eine eindeutige Identifikation enthält. Darüber hinaus werden mittels REST im Vergleich zu SOAP weniger Daten versendet. Ebenso sind die Dienste bei REST skalierbar. Das heißt, dass der Webservice sehr einfach und sehr komplex entwickelt werden kann. Ein großer Nachteil des REST-Transferprotokolls ist die fehlende Standardisierung, die z.B. für diese Schnittstelle von großer Bedeutung ist, da der Datenaustausch standardisiert erfolgen soll.

Der SOAP-Ansatz hat den Vorteil, dass dieser transportunabhängig ist, was folglich bedeutet, dass die Kommunikation nicht unbedingt über HTTP-Protokolle erfolgen muss und eine größere Freiheit bei der Umsetzung des Webservices besteht. Darüber hinaus werden SOAP-Webservice und die beinhalteten Objekte besser beschrieben. Die Nachrichten werden in Request/Response Objekte zusammengefasst, damit die Kommunikation standardisiert erfolgt, was sehr wichtig für die Schnittstelle ist. Der größte

²⁴ Als „endpoints“ oder Endpunkte wird in diesem Zusammenhang ein Port verstanden.

Nachteil von SOAP ist zusätzlicher „Overhead“²⁵ beim Datenaustausch was einen höheren Anspruch an die Kommunikationsinfrastruktur stellt.

4.2.4 Umsetzung

Unter Berücksichtigung der aktuellen Systeme am DLR Standort Berlin wurde die Schnittstelle gemäß eines SOAP-Webservices entwickelt. Dabei soll die Schnittstelle innerhalb des ServiceHub's implementiert werden. Der ServiceHub enthält bereits mehrere Webservice, die auf bestimmte Projekte aufgeteilt sind. Welche Projekte und weitere Informationen zum ServiceHub sind im Abschnitt 4.2.4.1 zu entnehmen.

Damit das Senden und Empfangen von Daten über die DOMINION-Plattform in Echtzeit überhaupt möglich ist, sollte diese um ein UMTS-Modul erweitert werden. Darüber hinaus sollte die DOMINION-Plattform um einen SOAP-Client erweitert werden, der den Webservice ansprechen kann. Diese Aufgabe wurde von der Automotive Abteilung des Instituts für Verkehrssystemtechnik des DLR in Braunschweig übernommen. Der große Aufwand der Einarbeitung in die DOMINION-Plattform als auch die räumliche Entfernung zu Braunschweig haben dazu beigetragen, diese Entscheidung zu treffen. Wichtig ist zu erwähnen, dass diese Erweiterungen zum Zeitpunkt der Umsetzung dieses Teils der Arbeit nicht vorhanden waren und es somit zu einer alternativen Lösung zur Erhebung von hochfrequenten FCD gekommen ist (siehe Kapitel 4.3.3).

4.2.4.1 ServiceHub und der Webservice

Der ServiceHub ist eine zentrale Anwendung für mehrere Webservice, die für unterschiedliche Zwecke benutzt werden. Mittlerweile existieren zwei Instanzen des ServiceHubs, die jeweils zu einem Projekt gehören. Eine Instanz beinhaltet Webservice, die im Rahmen des Projektes AIM laufen und die andere im Rahmen des Projektes MobiLind²⁶. Wie in der Abbildung 15 zu sehen ist, laufen die Dienste auf zwei unterschiedlichen Rechnern. Darüber hinaus besteht eine Benutzeroberfläche bzw. Webpräsenz, die eine ausführliche Dokumentation über die Webservice und das Projekt enthält.

²⁵ Als „overhead“ werden die Zusatzinformationen die Übermittelt werden bezeichnet. „Overhead“ wird als negativ in der mobilen Kommunikation betrachtet.

²⁶ MobiLind („Mobilität auf der Linder Höhe“) ist ein Projekt des DLRs das die Entwicklung eines Systems das als Intermodaler-Routing-Assistent agiert beschreibt. Die Projektkomponenten sind eine Applikation und die Webpräsenz.

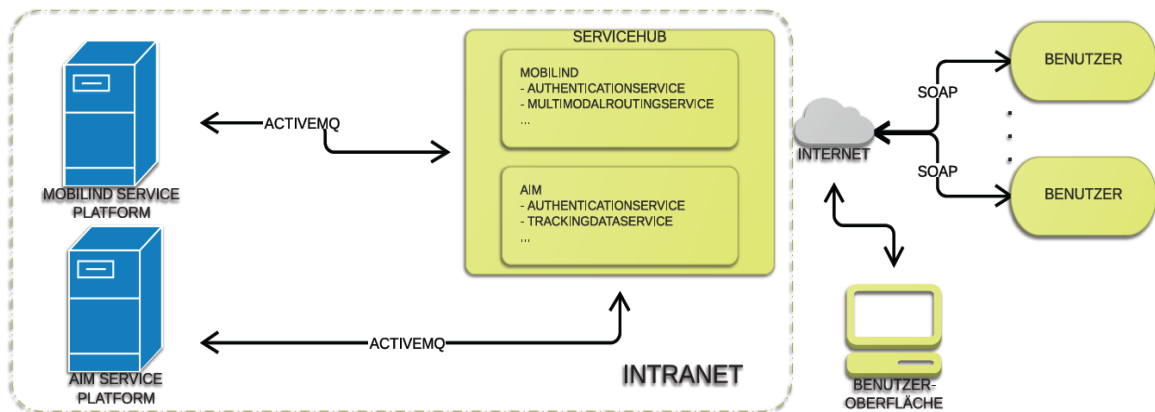


Abbildung 15. ServiceHub – Architektur des Datenaustauschs

Es gibt zwei wichtige Bausteine der Entwicklung eines Webservices, Erzeugen der benötigten Objekte und Erzeugung der Schnittstelle zum Benutzer. Die Objekte dienen einem standardisierten Austausch von Daten zwischen den Webservice und den TrackingDataService (siehe Abschnitt 4.2.4.4). Die Schnittstelle dient dem Empfangen und Senden der Informationen vom und zum Benutzer. Der Benutzer bekommt eine Beschreibung des Webservices durch die WSDL-Datei (siehe Abschnitt 4.2.3), die bei der Generierung des ServiceHubs automatisch erzeugt wird. Die entwickelten Objekte, die Schnittstelle und die WSDL-Datei sind im Anhang unter dem Verzeichnis „Webservice“ zu finden. Für den groben Überblick wird in der Abbildung 16 ein Teil der WSDL-Datei von der entwickelten Webservice-Schnittstelle dargestellt.

```
<message name="setTrackingData">
  <part name="parameters" element="tns:setTrackingData"/>
</message>
<message name="setTrackingDataResponse">
  <part name="parameters" element="tns:setTrackingDataResponse"/>
</message>
<message name="getTrackingData">
  <part name="parameters" element="tns:getTrackingData"/>
</message>
<message name="getTrackingDataResponse">
  <part name="parameters" element="tns:getTrackingDataResponse"/>
</message>
<portType name="AimTdpVehicleTrackingServiceImpl">
  <operation name="setTrackingData">
    <input wsam:Action="http://schemas.xmlsoap.org/ws/2004/08/wsdl/operation/1/AimTdpVehicleTrackingServiceImpl/setTrackingDataRequest" message="tns:setTrackingData"/>
    <output wsam:Action="http://schemas.xmlsoap.org/ws/2004/08/wsdl/operation/1/AimTdpVehicleTrackingServiceImpl/setTrackingDataResponse" message="tns:setTrackingDataResponse"/>
  </operation>
  <operation name="getTrackingData">
    <input wsam:Action="http://schemas.xmlsoap.org/ws/2004/08/wsdl/operation/2/AimTdpVehicleTrackingServiceImpl/getTrackingDataRequest" message="tns:getTrackingData"/>
    <output wsam:Action="http://schemas.xmlsoap.org/ws/2004/08/wsdl/operation/2/AimTdpVehicleTrackingServiceImpl/getTrackingDataResponse" message="tns:getTrackingDataResponse"/>
  </operation>
</portType>
```

Abbildung 16. Ein Abschnitt der WSDL Datei

Im dargestellten Ausschnitt der WSDL-Datei in Abbildung 16 sind die Aktionen, die an der Schnittstelle vorgenommen werden können, definiert. Das heißt, welche Methoden aufgerufen werden sollen, wenn eine Aktion vom Benutzer verlangt wird. Im Abschnitt 4.2.4.5 wird erläutert, wie die Beschreibung der Schnittstelle durch die WSDL-Datei beim Benutzer dargestellt wird.

4.2.4.2 Datenfluss

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen eines Teilprojekts von AIM durchgeführt. Daher sollen die empfangenen xFCD in die AIM-Datenbank am Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR am Standort Berlin zufließen. Um die Anforderung A.7 (mehrere Datensätze auf einmal zu senden und empfangen) erfüllen zu können, wird eine Funktion entwickelt, die mehrere Datensätze als Liste von Daten empfangen kann, falls die Verbindung zum Webservice während der Erfassung unterbrochen wird. Der Webservice enthält in der ersten Version zwei Funktionen, eine für das Schreiben von Daten und eine zweite für das Abfragen von Daten. Aufgrund der begrenzten Bandbreite beim Benutzer werden maximal 100 Datensätze auf einmal gesendet. Jedes Fahrzeug sendet eine SOAP-Anfrage mit seiner Fahrzeugidentifikationsnummer an den Webservice. Diese wird dann innerhalb des DLR-Intranets auf der AIM-Service-Plattform bearbeitet und anschließend wird eine Antwort an den Benutzer zurückgesendet. Falls keine Fehler bei der Authentifizierung, Datenprüfung oder Datenbankabfrage vorkommen, bekommt der Benutzer eine leere Antwort. Diese kann Rückschluss geben, ob alle Daten erfolgreich übernommen wurden. Falls ein Fehler aufgetreten ist, wird die Fehlerursache als Antwort zurückgegeben.

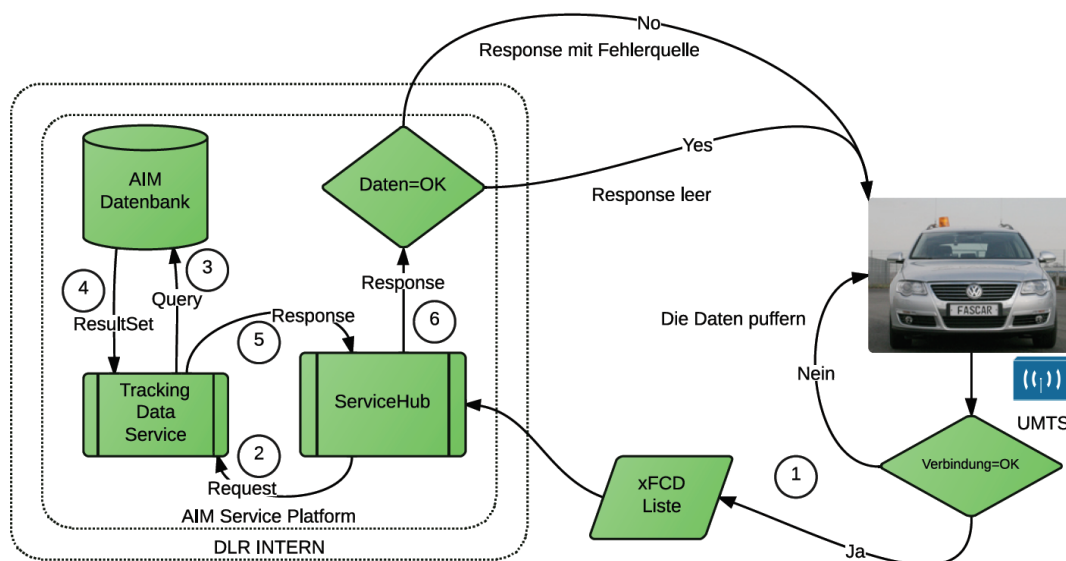


Abbildung 17. Datenfluss der xFCD von DOMINION bis zur AIM Datenbank

Quelle Fahrzeugbild: [42]

In der Abbildung 17 ist der Datenfluss vom Flottenfahrzeug bis zur Datenbank dargestellt. Wie in der Abbildung zu erkennen ist, überprüft die DOMINION-Plattform (siehe 4.2.1) zuerst intern, ob eine Verbindung möglich ist und falls nicht, werden die Daten lokal gespeichert. Im Fall, dass eine Verbindung zum Webservice möglich ist, sendet die DOMINION-Plattform eine Liste von xFCD-Meldungen. Diese wird vom ServiceHub als

ein Request-Objekt empfangen. Die Umwandlung in vordefinierte Objekte ist wegen der einheitlichen Kommunikation von großer Bedeutung. Das Request-Objekt wird zum TrackingDataService innerhalb eines TDPMessage-Objekts zugesendet (siehe 4.2.4.4). Die Daten werden innerhalb des TrackingDataServices validiert, in eine Datenbankanfrage umgewandelt und in die Datenbank geschrieben. In dem Fall, dass keine Fehler aufgetreten sind, wird das Response-Objekt leer an den Benutzer zurückgegeben. Bei Fehlern wird das Response-Objekt mit der entsprechenden Fehlerbeschreibung zurück an den Benutzer gegeben.

4.2.4.3 Datenbank

Für das Speichern der Daten wird eine bestehende Datenbank des Projekts AIM verwendet. Das verwendete Datenbanksystem ist PostgreSQL²⁷ der Version 9.1.9. Um die Datensicherung zu ermöglichen, wird in diesem Projekt nur eine Tabelle benötigt. Das Authentifizierungsverfahren wird von der TDP Framework-Plattform übernommen. In der Abbildung 18 ist die Generierungsanweisung dargestellt. In der Abbildung können die verwendeten Datentypen nachgelesen werden. Diese sind in dem PostgreSQL Portal [37] erklärt. Der Datentyp „geography“ ist ein in der PostGIS²⁸ Erweiterung von PostgreSQL, definierter Datentyp, der den Breiten- und Längengrad eines Objekts zusammenfasst. Darüber hinaus ist erkennbar, dass Fahrzeugidentifikationsnummer, Erhebungszeitstempel und Geokoordinaten nicht NULL sein dürfen, da ohne diese Daten nicht nachvollziehbar ist, welches Fahrzeug zu welchem Zeitpunkt an welcher Position war. Dies ist für die Routenerzeugung von wesentlicher Bedeutung.

```
CREATE TABLE "Tracking_Data"
(
    vehicle_id integer NOT NULL,
    acquisition_time timestamp without time zone NOT NULL,
    "position" geography(Point,4326) NOT NULL,
    altitude real,
    speed real,
    acceleration real,
    bearing real,
    position_accuracy real,
    steering_speed real,
    steering_angle real,
    brake_pressure real,
    distance_from_car_infront real,
    speed_of_car_infront real,
    is_abs_esp_on boolean DEFAULT false,
    is_windscreen_wiper_on boolean DEFAULT false,
    are_lights_on boolean DEFAULT false,
    are_indicator_lights_on boolean DEFAULT false
)
```

Abbildung 18. Webservice Tabellengenerierungsanweisung

²⁷ PostgreSQL ist ein leistungsfähiges Open-Source Datenbanksystem. Es ist für alle gängige Betriebssysteme geeignet. (vgl. [37])

²⁸ PostGIS ist eine Erweiterung von PostgreSQL die geographische Datentypen und Funktionen für diese Datentypen bereitstellt. (vgl. [38])

4.2.4.4 TrackingDataService

Um die Schnittstelle zu vervollständigen wird ein Dienst benötigt, der die Nachrichten von dem ServiceHub empfängt und in die Datenbank schreibt. Genau das ist die Aufgabe des TrackingDataServices. Dieser Dienst agiert auf dem AIM-Rechner. Die eigentliche Aufgabe des Diensts ist es, die TDPMMessage umzuwandeln und in die Datenbank schreiben. Die TDPMMessage ist ein Objekt zum Nachrichtenaustausch, der innerhalb des TDP Service-Frameworks (siehe 4.2.1) definiert ist. Der Aufbau der Nachricht ist in der Abbildung 19 zu finden. Der TrackingDataService ist im Anhang unter dem Verzeichnis „Webservice“ zu finden.

Beschreibung der Parameter:

- command: welche Methode wurde bei dem Aufruf des Webservices benutzt
- parameters: alle Parameter bzw. Objekte die während des Aufrufs übergeben wurden
- returnFormat: welches Rückgabeformat benutzt werden soll (JSON, Gson, usw.)

```
private String      command;
private T           parameters;
private MessageFormat returnFormat;

public TDPMMessage(String command, T parameters, MessageFormat returnFormat) {
    this.command = command;
    this.parameters = parameters;
    this.returnFormat = returnFormat;
}
```

Abbildung 19. Aufbau des TDPMMessage Objekts

Nachdem die Nachricht empfangen wird, werden die einzelnen Parameter abgefragt und für die weitere Auswertung benutzt. Zuerst ist es wichtig zu wissen, welche Methode der Benutzer benutzt. Zurzeit bestehen nur die zwei Funktionen getTrackingData() und setTrackingData(). Des Weiteren werden die übergebenen Parameter abgefragt und in Objekte umgewandelt. Diese werden geprüft und falls keine Fehler erkannt werden, in die Datenbank geschrieben oder anhand der Fahrzeugidentifikationsnummer aus der Datenbank gelesen. In dem Fall, dass ein Fehler während dieses Vorgangs zu Stande kommt, wird eine ErrorMessage geschrieben und zurückgegeben. In die ErrorMessage kann eine Liste von Fehlermeldungen geschrieben werden und somit wird dem Benutzer mitgeteilt, welche Fehler bei der Übergabe der Daten vorgekommen sind.

Konfigurationsdateien

Damit der Dienst überhaupt agieren kann, wurden zwei Konfigurationsdateien definiert, die wichtige Daten für den Dienst beinhalten. Eine Datei enthält die Datenbankdaten und die andere die dienstspezifischen Daten. Die Datenbankkonfigurationsdatei beinhaltet:

- Datenbank IP Adresse
- Port
- Benutzername
- Kennwort
- Datenbankname
- Tabellename

Die Dienstkonfigurationsdatei beinhaltet folgende Daten:

- IP Adresse des Rechners
- Port über welchen der Dienst ansprechbar ist
- ID des Diensts
- Benachrichtigung ID (für den ServiceHub)

Logdateien

Damit eine schnelle Informations- und Fehlerfindung möglich ist, werden dienstrelevante Informationen in eine Logdatei geschrieben. Um einen einfachen Überblick zu schaffen, wird täglich eine neue Datei angelegt. In die Logdatei werden Informationen wie neue Aufrufe und Fehlerquellen geschrieben. Ein Beispiel der Logdatei ist im Anhang unter dem Verzeichnis „Webservice/TrackinDataService“ zu finden.

4.2.4.5 Test der Schnittstelle

Nachdem die Schnittstelle bereitgestellt wurde, wurden ausführliche Tests durchgeführt, um Fehler zu verhindern. Es sollten alle möglichen Fehlervorfälle betrachtet werden, um ein stabiles Webservice zu gewährleisten. Zuerst wurde getestet, ob die Kommunikation zwischen allen Modulen der Schnittstelle mangelfrei funktioniert. Anschließend wurde eine Betrachtung der Fehlermeldungen vorgenommen, das heißt, es wurde geprüft, ob der Benutzer immer eine passende Fehlerbeschreibung erhielt. Diese soll den Fehler möglichst kurz und eindeutig beschreiben. In diesen Abschnitt wird ein Beispiel der Tests vorgestellt und erläutert.

Das Test-SOAP Request-Objekt wird in der Abbildung 2 dargestellt. In diesem Request-Objekt werden die SessionID und die FahrzeugID übergeben, um die xFCD-Meldungen von dem jeweiligen Fahrzeug aus der Datenbank zu erhalten.

```

<soap:Body>
  <getTrackingData xmlns="http://example.webservice.dlr.de/">
    <request xmlns="">
      <sessionId>0123456789101112131415</sessionId>
      <vehicleId>1111</vehicleId>
    </request>
  </getTrackingData>
</soap:Body>

```

Abbildung 20. Test-Soap Request

Es wird zuerst geprüft ob die SessionID gültig und aktuell ist. Wenn das nicht der Falls ist, wird die Fehlermeldung aus Abbildung 21 zum Benutzer zurückgegeben.

```

<S:Body>
  <ns2:getTrackingDataResponse xmlns:ns2="http://example.webservice.dlr.de/">
    <ResponseGetTrackingData>
      <errorMessages>USER_06:SessionId is not valid</errorMessages>
      <vehicleId>-1</vehicleId>
    </ResponseGetTrackingData>
  </ns2:getTrackingDataResponse>
</S:Body>

```

Abbildung 21. Fehlermeldung bei einer ungültigen SessionID

In dem Fall, dass die SessionID erfolgreich validiert wurde und die Fahrzeugidentifikationsnummer in der Datenbank gefunden wurde, wird ein Response-Objekt wie in der Abbildung 22 dargestellt ist, zurückgegeben. Das Response-Objekt in der Abbildung stellt die erhaltene xFCD für die jeweilige FahrzeugID dar. In diesem Beispiel ist nur ein Datensatz für die FahrzeugID 1111 in der Datenbank verfügbar.

```

<S:Body>
  <ns2:getTrackingDataResponse xmlns:ns2="http://example.webservice.dlr.de/">
    <ResponseGetTrackingData>
      <trackList>
        <ABSandESPOn>false</ABSandESPOn>
        <acceleration>8.0</acceleration>
        <accuracyOfPosition>1.0</accuracyOfPosition>
        <acquisitionTime>2013-08-30 17:17:17</acquisitionTime>
        <altitude>100.0</altitude>
        <bearing>0.0</bearing>
        <brakePressure>0.0</brakePressure>
        <distanceFromCarInfront>10.0</distanceFromCarInfront>
        <indicatorLightsOn>false</indicatorLightsOn>
        <latitude>10.645</latitude>
        <lightsOn>true</lightsOn>
        <longitude>52.9877</longitude>
        <speed>30.4</speed>
        <speedOfCarInfront>36.2</speedOfCarInfront>
        <steerAngle>3.1</steerAngle>
        <steeringSpeed>0.3</steeringSpeed>
        <windscreenWiperOn>false</windscreenWiperOn>
      </trackList>
      <vehicleId>1111</vehicleId>
    </ResponseGetTrackingData>
  </ns2:getTrackingDataResponse>
</S:Body>

```

Abbildung 22. Test SOAP Response ohne Fehler

Weitere Tests der Schnittstelle können im Anhang gefunden werden. Darüber hinaus können weiteren Fehlereintritte berücksichtigt werden im Quellcode des

TrackingDataServices im Anhang unter dem Verzeichnis „Webservice/TrackingDataService“ gefunden werden.

4.2.5 Zukunftsperspektive der entwickelten Schnittstelle

Die DOMINION – TDP Service-Framework-Schnittstelle soll in der Zukunft zur drahtlosen Übertragung von CAN-, Radar und Positionsechtzeitdaten der DLR-Fahrzeugflotte dienen. In Tabelle 2 wurden aktuelle Kenngrößen aufgelistet, die flexibel erweitert werden können. Daten, die in die AIM-Datenbank fließen, können für zukünftige Forschungsprojekte verwendet werden. Das Spektrum des Nutzungsbereichs ist sehr groß, da die Daten eine sehr umfangreiche Beschreibung des Fahrerverhaltens und Verkehrszustands liefern. Somit kann die Verkehrssicherheit und Verkehrsqualität durch zahlreiche Forschungsprojekte erhöht werden.

Der aktuelle Zeitplan sieht vor, den Webservice für die Erfassung von WLAN-/Bluetooth-Daten zu erweitern. Diese werden in dem Car2X-Ansatz der Verkehrslageerfassung benutzt, um moderne verkehrsadaptive Lichtsignalanlagensysteme besser steuern zu können oder um unterschiedliche Verkehrskenngrößen berechnen zu können. Die Bluetooth-Datenerfassung bezieht sich auf Bluetooth-Geräte, die sich in der Nähe einer Kreuzung befinden. Ein Bluetooth-Empfänger ist auf jeder Kreuzung installiert und speichert die Bluetooth-Daten von Geräten, die sich in der Umgebung befinden, in eine Datenbank. Jedes Bluetooth-Gerät hat eine eindeutige Identifikationsnummer, mit der durch Auswertung der Trajektorien identifiziert werden kann, wie sich das Fahrzeug fortbewegt hat. Mit diesem Ansatz können auch weitere Daten empfangen werden wie z.B. Fußgängerdaten. Das WLAN wird in der Car2X-Kommunikation angewendet, um den Datenaustausch zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur zu gewährleisten.

4.3 Planung und Durchführung der Messkampagne

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Messkampagne, die zur Erhebung von hochfrequenten FCD am Standort Braunschweig durchgeführt wurde. Die Messdaten werden in der vorliegenden Arbeit benötigt, um die Rückstaulängenschätzung vor LSA mittels hochfrequenter FCD auszuwerten und zu optimieren. Eine umfangreiche Planung der Messkampagne war von großer Bedeutung, da bereits kleine Planungsfehler zum Scheitern führen konnten. Deshalb hat die Planung zwei Monaten vor der eigentlichen Durchführung der Messkampagne stattgefunden. Der ursprüngliche Plan war es, die FCD über die Webservice-Schnittstelle zu übermitteln, jedoch wurde das Modul zum Versenden der Daten zu diesem Zeitpunkt nicht vollständig entwickelt. Deshalb wurden die Fahrzeug- und Positionsdaten mit der NDS-Plattform (siehe 4.3.3) erfasst und lokal

gespeichert. Weitere Planungs- und Durchfüh­rungs­herausforderungen sind in den folgenden Abschnitten beschrieben.

4.3.1 Auswahl der Kreuzungen

Eine der zentralen Fragen vor der Messkampagne war, welche Knotenpunkte in Braunschweig am geeignetsten zur Erhebung der FCD- und Videodaten sind. Da eine umfangreiche Rückstaulängenschätzung an einer LSA, die wenig Verkehr aufweist, kein konkretes Ergebnis bringt, wurden die Kreuzungen vor der Messkampagne ausgewählt und bewertet. Die Auswahl wurde auf den Braunschweiger Ring, der in der Abbildung 23 dargestellt ist, begrenzt. In der Abbildung bezeichnet die gestrichelte Linie eine noch auszubauende Infrastruktur zur Erfassung von Fahrzeugdaten. Aufgrund des Interesses neben den hochfrequenten FCD ebenso Bluetooth/WLAN-Daten während der Messkampagne zu erfassen, wurde der Bereich der Kreuzungsauswahl auf den östlichen Teil des Stadtrings beschränkt.

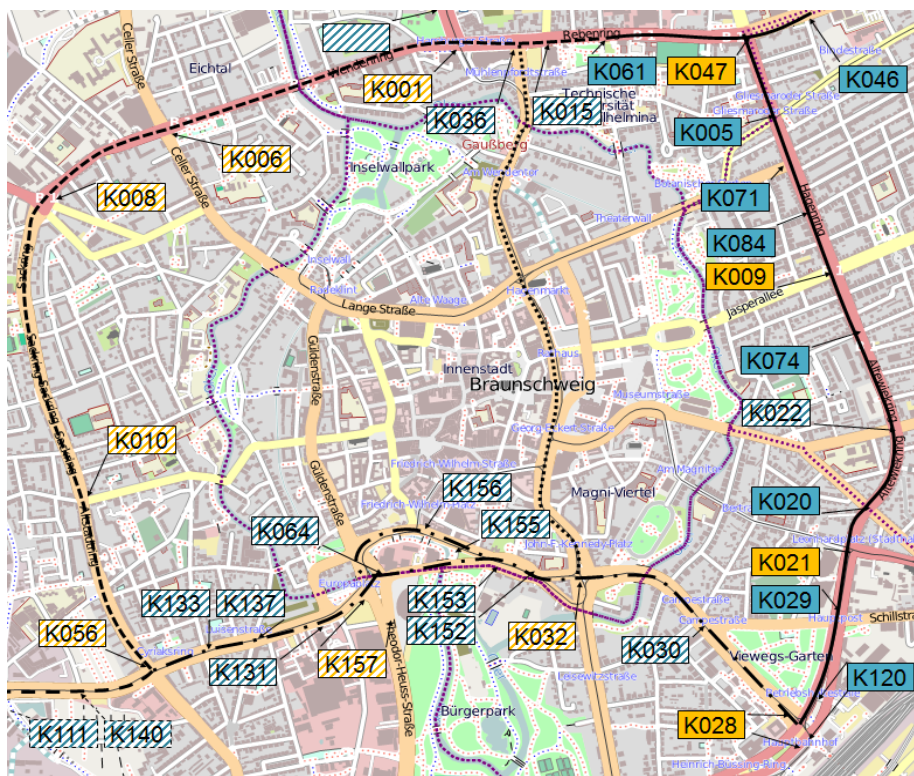


Abbildung 23. Braunschweiger Ring und die interessanten Kreuzungen und zugehörige Identifikation

Quelle: [50]

Die Auswertung der Kreuzungen erfolgte über die schon verfügbaren Taxi-FCD. Durch die Auswertung der Anzahl der FCD-Meldungen in einem bestimmten Bereich vor der Kreuzung kann im Vergleich zu anderen Kreuzungen ein grober Rückschluss auf das Verhalten der Verkehrsdichte und Verkehrsnachfrage gemacht werden. Eine erhöhte Anzahl von FCD-Meldungen vor der LSA weist Rückstau aus. Kreuzungen mit einer

hohen Verkehrsdichte sind für die Messkampagne von größerer Bedeutung, da ein erhöhtes Verkehrsaufkommen einen Rückstau verursacht. Das Diagramm 5 stellt die Anzahl der Taxi-FCD-Meldungen im Abständen von 5 Meter dar. Das Diagramm weist ein hohes Verkehrsaufkommen an der Forschungskreuzung K047 am südlichen Kreuzungsarm auf. Die Forschungskreuzung ist eine im Rahmen des Projekts AIM (siehe 4.2.4) aufgebaute Kreuzungsinfrastruktur, die durch Erfassung von Verkehrsdaten aus mehreren Quellen zur Erforschung des Verkehrs dient.

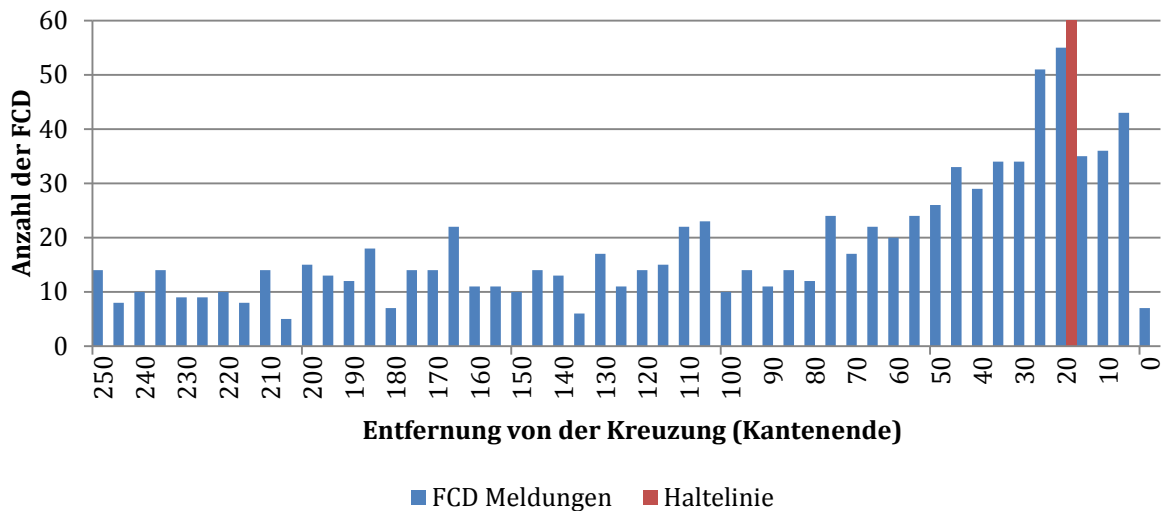


Diagramm 5. Forschungskreuzung K047 südlicher Kreuzungsarm – Taxi FCD Meldungen für Monat Mai

Zur Bewertung der Kreuzungen am östlichen Teil des Braunschweiger Stadtrings wurden für jede größere Kreuzung vier Diagramme, jeweils eine per Kreuzungsarm, wie Diagramm 5 erstellt, das anhand der Taxi-FCD die Verkehrsdichte verdeutlicht. Dabei musste beachtet werden, ob und an welchen Kreuzungen zur Zeit der Messkampagne Baustellen oder andere Verhinderungen eines störungsfreien Verkehrsflusses bestehen. Die Entscheidung der Knotenpunktwahl ist auf die Kreuzungen in der Tabelle 4 gefallen. Der anfängliche Plan war es, die Messungen eine Woche lang durchzuführen, jedoch wurden anschließend das Wochenende wegen mangelnden Verkehrs und der Montag aufgrund der Implementierung der NDS-Plattform in das Fahrzeug aus der Messkampagne ausgeschlossen.

Tabelle 4. Ausgewählte Kreuzungen - Messkampagne

Kreuzungs ID	Kreuzungsarm	Datum
K047	Westen	20.08.13
K047	Süden	21.08.13
K020	Osten	22.08.13
K029	Süden	23.08.13

4.3.2 Einsatzplanung und Ausstattung der Messfahrzeuge

Aufgrund der Messkampagnendauer, die eine Arbeitswoche betrug, und der Einplanung des Personals in andere Projekte, musste eine Personaleinsatzplanung durchgeführt werden. Das DLR-Forschungsfahrzeug zur Videoerfassung und ein weiteres Messfahrzeug (Pkw) zur Erhebung von hochfrequenten FCD werden von 6 bis 20 Uhr an dem jeweiligen Messkampagnentag eingesetzt. Da die Fahrt über eine bestimmte Route 14 Stunden lang sehr monoton sein kann, wurde eine Minimumbesetzung von drei Personen pro Messkampagnentag durchgeführt. Eine Person soll die Videodatenerfassung überwachen und für Interessenten im Forschungsfahrzeug verfügbar sein. Des Weiteren fährt eine zweite Person das Messfahrzeug, während sich die Dritte von der Fahrt erholt bzw. als Beifahrer mitfährt.

Das DLR-Forschungsfahrzeug UTRaCar ist mit einem 13 Meter hohen Mast ausgestattet, der bis zu drei Kameras tragen kann. In Abhängigkeit von der Position des Forschungsfahrzeugs und der Kreuzungsgröße wurden während der Messkampagne ein bis drei Kameras eingesetzt. Im Fahrzeug steht ein Rechner zur Verfügung, an dem unter anderem über ein intern entwickeltes Programm die Bilder der Kameras zu jedem Zeitpunkt verfolgt werden können. Über ein Steuergerät können die Kameras bis zu 330 Grad geschwenkt und 360 Grad geneigt werden, um einen optimalen Winkel zu schaffen. Die Elektronik im Fahrzeug wird über einen Zusatzgenerator betrieben. Dieser kann, wenn benötigt, geladen werden während der Motor läuft.



Abbildung 24. DLR Messfahrzeug - UTRaCar

Die Erhebung von hochfrequenten FCD soll mit einem zusätzlichen Fahrzeug, das mit der NDS-Plattform (siehe 4.3.3) zur Erfassung von FCD ausgestattet ist, durchgeführt werden. Der Meldungstakt beträgt 18 FCD-Meldungen pro Sekunde. Damit die Messkampagne maximal ausgenutzt wird, wurden weitere Daten wie Radardaten und das Fahrerverhalten mittels Kamera mit der NDS-Plattform erfasst. Das bedeutet, dass keine FCD sondern genauer xFCD (siehe Abschnitt 3.3) und weitere Fahrerverhaltensdaten erfasst wurden.

4.3.3 NDS-Plattform

NDS steht für „Naturalistic Driving Studies“, die zur Erforschung des Fahrerverhaltens dienen. Die Hauptidee dieser Plattform ist die Unfallanzahl durch den Einsatz der Studieninformationen zu minimieren. Der größte Vorteil der NDS-Plattform im Vergleich zu anderen Studien ist die Betrachtung des Fahrerverhaltens im realen Umfeld ohne Vorgaben. (vgl. [13] S2.)

Während einer NDS-Studie werden Fahrzeug-, Fahrer-, Positions- und Verkehrsdaten erfasst. Die Kommunikation zwischen der Fahrzeugsensorik und der Plattform erfolgt über das CAN-Bus²⁹-System des Fahrzeugs. Wie in Abbildung 25 dargestellt ist, kann viel Sensorik an die NDS-Plattform angeschlossen werden. Dies ist für die Studien von großer Bedeutung, da eine flexible Studiengestaltungsmöglichkeit geboten werden kann.

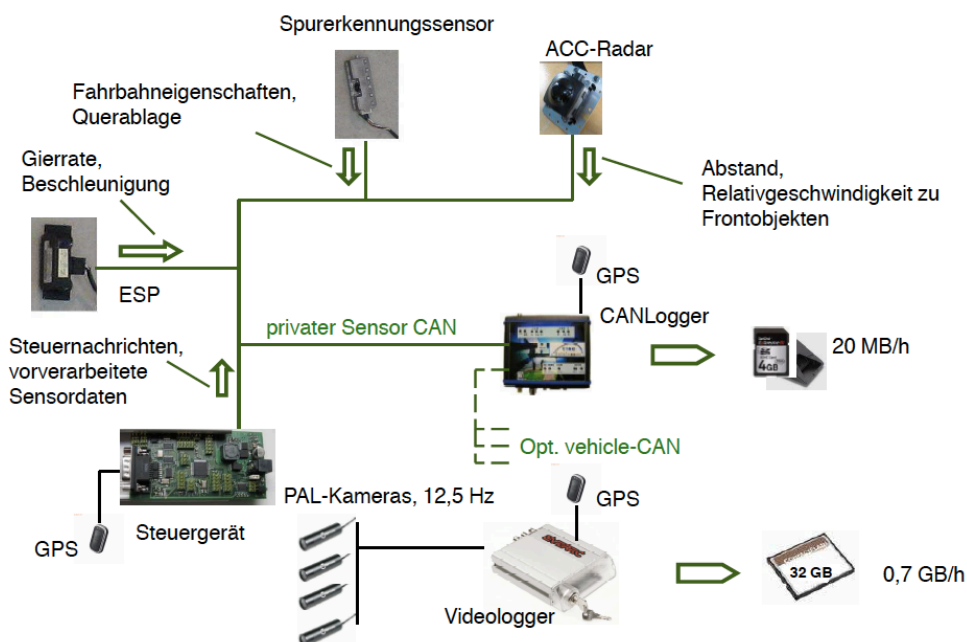


Abbildung 25. NDS Plattform – Topologie

Quelle: [29]

²⁹ Controller Area Network – serielles, asynchrones Bussystem, das der Kommunikation zwischen Steuereinheiten, Sensoren und Aktuatoren innerhalb eines Fahrzeugs dient.

Aufgrund der Möglichkeit eine NDS-Studie in die Messkampagne zu integrieren und dazu hochfrequente FCD über dieselbe Plattform zu erfassen, wurde es parallel umgesetzt. Von der großen Menge an Daten, die über die NDS-Plattform erfasst werden können, wurden Radar-, Kamera-, CAN-Bus- und Positionsdaten aufgezeichnet. Eine GPS-Antenne wurde am Datenlogger angeschlossen, um die Positionsdaten zu empfangen und zusammen mit dem Zeitstempel und weiteren Daten der Studie in eine Oracle-datenbank-basierte Tabelle zu speichern.

4.3.4 Erforderliche Genehmigungen zur Durchführung der Messkampagne

Um die Umsetzung der Messkampagne zu ermöglichen, wurden bestimmte Genehmigungen benötigt. Vor allem war die Zustimmung der Stadt Braunschweig für die Sondernutzung der öffentlichen Straßen und Gehwege notwendig. Darüber hinaus mussten Halteverbote beantragt werden. In einem Anschreiben an die Stadt Braunschweig wurden alle Informationen zusammengefasst wie z.B. zu welchem Zweck die Messkampagne durchgeführt wird, Kreuzungsauswahl, Messfahrzeugdaten, von welcher Stelle das Messfahrzeug die Videodaten erfassen soll, usw. Dieses Schreiben befindet sich im Anhang dieser Arbeit unter dem Verzeichnis „Messkampagnendaten“.

Im Abschnitt 4.3.1 ist die Auswahl der Kreuzungen, die von Interesse sind, erläutert, jedoch wurde nicht geprüft, ob und von welcher Stelle an der jeweiligen Kreuzung eine Videodatenerfassung durchgeführt werden kann. Darüber hinaus wurde nicht geprüft, an welcher Stelle der Kreuzung das Forschungsfahrzeug stehen darf und kann. Aus diesem Grund wurde zuerst eine Auswertung per GoogleMaps durchgeführt und anschließend eine Besichtigung der realen Lage am Standort Braunschweig vom Projektmitarbeiter unternommen. Während der Besichtigung wurden die Messzonen besucht und die Halteverbote mit einer vertretenden Person der Abteilung Straßenverkehr der Stadt Braunschweig besprochen. Die Halteverbotsdokumentation ist in dem Anhang unter dem Verzeichnis „Messkampagnendaten“ zu finden.

4.4 Systematische Auswertung der Messdaten

Nachdem die Messkampagne erfolgreich abgeschlossen wurde, sollten die erfassten Daten zuerst ausgewertet werden. Als Auswertung bezeichnet man in diesem Zusammenhang das Auslesen der Rückstaulängen aus den Videodaten und die Durchführung des Map-Matchings (siehe Abschnitt 3.2.2) über ein bestehendes DLR internes Map-Matching-Verfahren mit den erhobenen hochfrequenten FCD. Aufgrund des spezifischen Intervalls von 18 Positionsmeldungen pro Sekunde erschien es sinnvoll, die hochfrequenten FCD auf Sekundenintervalle auszudünnen. So ein kleines Intervall hat

den Zweck, Fahrerreaktionszeiten in bestimmten Situationen zu berücksichtigen, was im Rahmen dieser Masterarbeit jedoch vernachlässigt wird. Das Filtern der Daten könnte einfach mit einem Java-basierten Parser umgesetzt werden. Da es sich in diesem Fall nicht um herkömmliche FCD-Meldungen handelt, sondern um erweiterte FCD -Meldungen bzw. xFCD, mussten nicht benötigte Daten in dem Parser auch herausgefiltert werden.

In diesem Abschnitt wird die Funktionsweise des Parsers erläutert. Im Wesentlichen liest der Parser Zeilen aus der Datenbank ein und filtert diese anhand des Zeitstempels. Dabei wird nur ein Eintrag pro Sekunde für den Export berücksichtigt. Außerdem werden nur die Informationen in den Zeilen zum Export weitergeleitet, die für das Map-Matching-Verfahren benötigt werden. Im Folgenden werden die erzeugten Daten aufgelistet.

Benötigte Inputdaten für das Map-Matching :

- Fahrzeugidentifikationsnummer
- Zeitstempel (im Format yyyy-mm-dd hh:mm:ss)
- Längengrad der GPS Position
- Breitengrad der GPS Position

Aus den genannten Inputdaten erzeugt der Map-Matcher mehrere Ausgaben:

- KML Dateien zur Ansicht in z.B. GoogleEarth
- Kanten-Matching: Die Positionsdaten werden auf Kanten „gematcht“ wobei durchschnittliche Werte für diese Kanten berechnet werden
- Positionsmeldungs-Matching: Die Positionsdaten werden gefiltert, wobei die verbleibenden Daten auf Kanten „gematcht“ werden. Die Ausgabe enthält:
 - Trajektorienidentifikationsnummer
 - Zeitstempel der GPS Meldung
 - Fahrzeugidentifikationsnummer
 - Kantenidentifikationsnummer
 - Positionsentfernung vom Kantenanfang in m
 - GPS Geschwindigkeit in km/h
 - Reisegeschwindigkeit in km/h
 - zurückgelegte Entfernung vom Trajektorienstart in m

Für den DPAnalyzer und das einfache Verfahren zur Rückstaulängenschätzung (siehe Kapitel 5.1) werden Daten, die im Positionsmeldungs-Matching aufgezählt sind, benötigt, da diese aktuelle Fahrzeug- und Positionsdaten liefern. Die KML-Dateien können für die graphische Darstellung der Matches verwendet werden, um den Verteilungstrend der Matches auf einer Karte visualisieren zu können. In der Abbildung 26 ist der Datenfluss von xFCD-Rohdaten bis zur Kartendarstellung der Matches dargestellt. Die Rohdaten und die Matches sind im Anhang unter dem Verzeichnis „Messkampagnendaten“ zu finden.

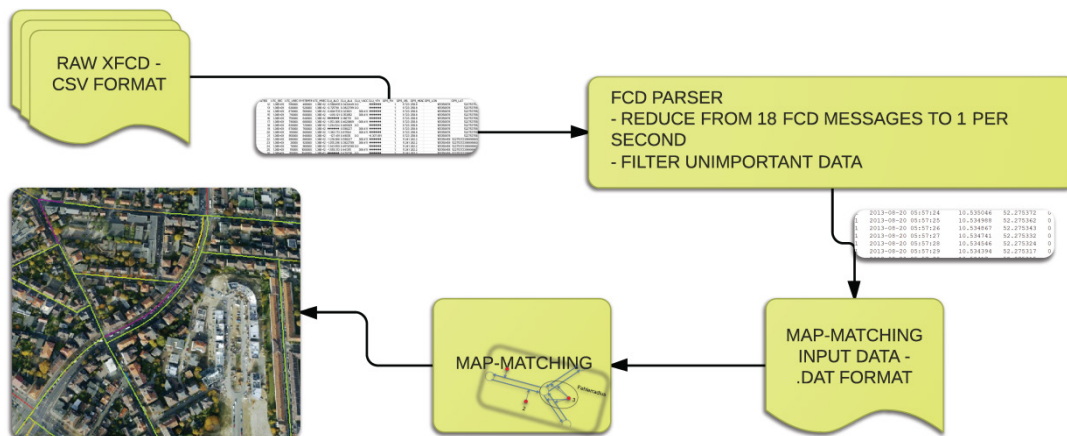


Abbildung 26. Datenfluss der Erfassungsdaten von xFCD bis zur Karten-Matches

Quelle Kartenansicht: GoogleEarth [47]

Des Weiteren wurde das Videomaterial analysiert, um die realen Rückstaulängen zu bestimmten Zeitpunkten abzubilden. Da keine funktionsfähigen Softwarelösungen zur automatischen Bestimmung von Rückstaulängen zur Verfügung standen, wurden die Videodaten manuell analysiert. Aufgrund der in Braunschweig festen LSA-Umlaufzeit von 1:25 Minuten war es einfach zu bestimmen, wann die Rotphase endet. Deshalb wurden die Rotphasenendzeiten im Voraus berechnet, um die Arbeit zu vereinfachen und zu beschleunigen. Die Rotphasenzeiten können einfach berechnet werden wenn die Zeit der ersten Rotphase bekannt ist. Auf die Zeit wird anschließend die LSA-Umlaufzeit addiert um die nächste Rotphasenzeit zu berechnen. Die Arbeit wurde in dem Sinne beschleunigt dass nicht alle Frames (Bilder) der Messkampagnenvideodaten analysiert werden mussten sondern nur diejenigen die im bestimmten Zeitraum aufgenommen wurden. Darüber hinaus wurden Pylonen in 10-Meter-Abständen als Referenzlängen vor jeder Messung auf der jeweiligen Straße aufgestellt. Ferner wurden die Entfernungen von markanten Gegenständen von der Haltelinie zusätzlich als Referenzlängen gemessen.

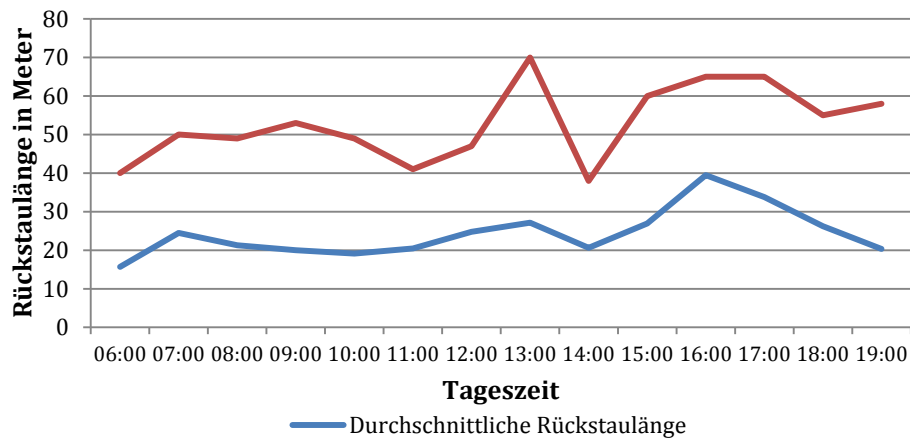


Diagramm 6. Ergebnisse der Videodatenauswertung für die Kreuzung K047, westlicher Kreuzungsarm (stündliche Auswertung)

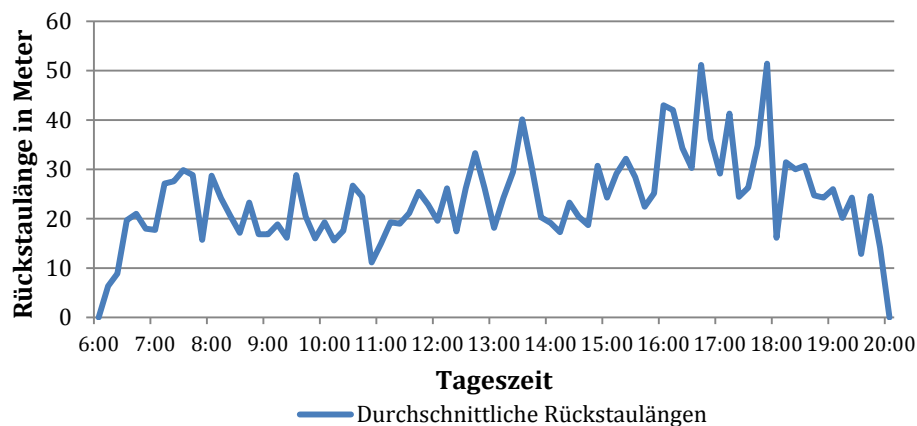


Diagramm 7. Ergebnisse der Videodatenauswertung für die Kreuzung K047, westlicher Kreuzungsarm (10-Minutige Auswertung)

Wie im Diagramm 6 zu sehen ist, verhält sich die Kurve der realen durchschnittlichen Rückstaulänge wie erwartet. Das heißt, dass abhängig von dem jeweiligen Kreuzungsarm die durchschnittliche Rückstaulänge in den Hauptverkehrszeiten länger ist. Wenn der Rückstaulängentagesgang der Kreuzung K047-Westen betrachtet wird, wird erkennbar, dass eine erhöhte Anzahl von Fahrzeugen nachmittags um die Hauptverkehrszeiten die Stadt verlässt. Dieses Verhalten ist nachvollziehbar, da dieser Kreuzungsarm aus der Stadt führt und mehr Verkehr um Arbeitsendzeiten zu erwarten ist. Im Gegensatz zum Nachmittag ist die Erhöhung der Verkehrsnachfrage am Morgen an der Kreuzung K047-Westen eher unauffällig. Aus dem Diagramm 7 und Diagramm 9, welche die durchschnittlichen Rückstaulängen im 10-Minuten-Takt darstellen, ist erkennbar, wie die Verkehrsnachfrage im realen Umfeld zu ständigen Änderungen in kurzen Zeiträumen kommt und damit sehr schwer mit einer Simulationssoftware simuliert werden kann. Die maximale Rückstaulänge wurde im Diagramm 6 erstaunlicherweise um die Mittagszeit erreicht. Grund dafür kann eine Lichtsignalanlagenschaltzeitänderung an den Kreuzungen, die im Straßennetz vor der Kreuzung K047-Westen liegen, sein.

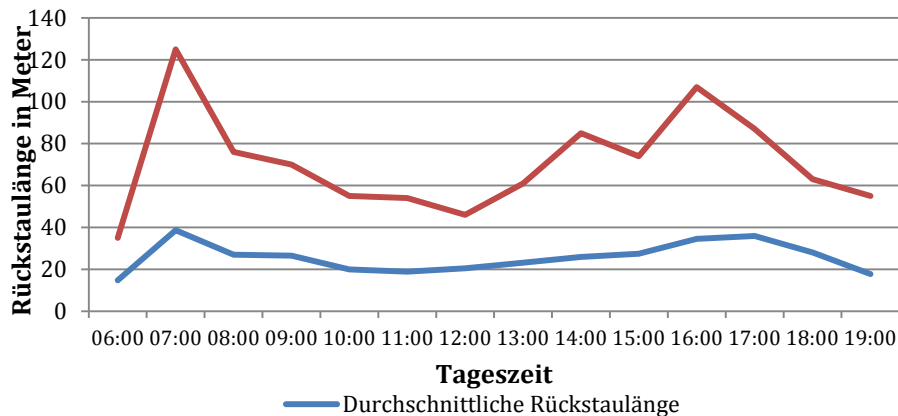


Diagramm 8. Ergebnisse der Videodatenauswertung für die Kreuzung K020, westlicher Kreuzungsarm (stündliche Auswertung)

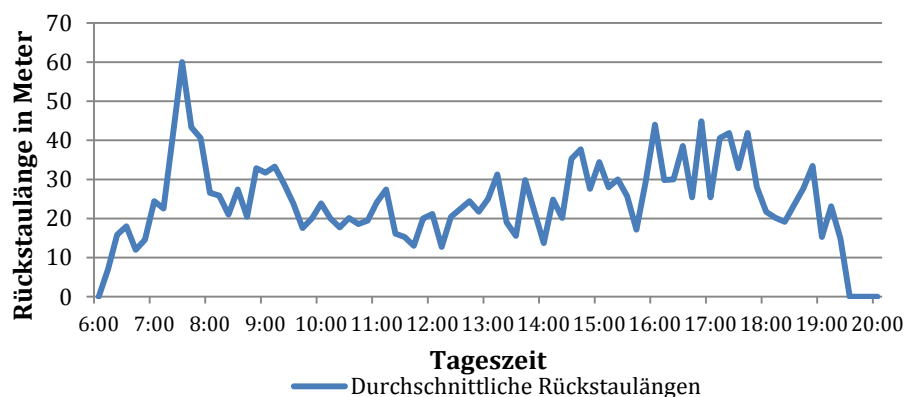


Diagramm 9. Ergebnisse der Videodatenauswertung für die Kreuzung K020, westlicher Kreuzungsarm (10-Minutige Auswertung)

Im Vergleich zur Kreuzung K047-Westen ist ein steiler Aufstieg der durchschnittlichen Rückstaulängen an der Kreuzung K020-Osten (Diagramm 8) eher um die Hauptverkehrszeiten am Morgen zu erkennen. Dies fällt bei der 10-minütigen Auswertung um 07:30 besonders auf, wo die durchschnittliche Rückstaulänge ihr Maximum erreicht. Da es sich um eine Einbahnstraße handelt, die zum Stadtzentrum führt existiert – wie zu erwarten – eine Erhöhung der Verkehrsnachfrage während der Hauptverkehrsstunde am Morgen. Weiterhin ist eine weniger auffallende Erhöhung der Verkehrsnachfrage während der Hauptverkehrsstunde am Nachmittag erkennbar.

5. Validierung der Rückstaulängenschätzung mittels FCD

In diesem Kapitel wird die Rückstaulängenschätzung vor Lichtsignalanlagen mittels hochfrequenter und Taxi-FCD validiert. Im ersten Teil des Kapitels wird das einfache Verfahren zur Rückstaulängenschätzung „SQLEstimator“ vorgestellt. Des Weiteren wird das Programm, das den „SQLEstimator“ und den „DPAnalyzer“ implementiert und die Schätzergebnisse darstellt, veranschaulicht. Darüber hinaus werden die Berechnungen, die vor einer Schätzung vorgenommen werden, präsentiert und erklärt. Anschließend werden Schätzergebnisse, Schätzfehleranalysen und Schlussbetrachtungen vorgestellt.

5.1 Implementierung eines einfachen Verfahrens zur Rückstaulängenschätzung

Bevor der „DPAnalyzer“ im realen Umfeld getestet werden konnte, sollte im Rahmen der Masterarbeit ein einfaches Verfahren zur Rückstaulängenschätzung entwickelt werden. Der Ansatz sollte die vorhandenen Daten der Messkampagne nutzen, um die Rückstaulängen zu bestimmen. Diese Ergebnisse werden anschließend mit denen des „DPAnalyzers“ verglichen.

„SQLEstimator“ steht für „Simple Queue Length Estimator“, ein einfaches Verfahren zur Rückstaulängenbestimmung mittels hochfrequenten FCD. Durch die vorhandenen hochfrequenten Daten kann eine relativ genaue Fahrgeschwindigkeit berechnet werden, da das Intervall zwischen zwei Meldungen klein ist. Somit kam die Idee, die Fahrgeschwindigkeit als Referenz zum Rückstauende zu nutzen. Das heißt, wenn sich das Fahrzeug unterhalb einer bestimmten, festzulegenden Fahrgeschwindigkeit durch den vordefinierten Bereich des Kreuzungsarms bewegt, kann diese Entfernung zur Haltelinie als Rückstaulänge bestimmt werden. In Zukunft könnte das Verfahren insofern erweitert werden, dass im Falle des Vorhandenseins von LSA-Schaltdaten berechnet werden könnte, wie viel Zeit die Bildung des aktuellen Rückstaus in Anspruch genommen hat. Mittels dieser Daten kann die durchschnittliche Rückstaubildung pro Sekunde berechnet werden, wodurch ermöglicht wird, mit nur einem Floating Car Datensatz vor der LSA die Rückstaulänge zu schätzen.

Wie im Diagramm 10 zu sehen ist, berücksichtigt das Verfahren die Positionsdaten bis zu der Meldung (grüner Bereich), bei der die Fahrgeschwindigkeit unter der vordefinierten Grenze liegt. In diesem Beispiel ist $v_{\max} = 2$ Kilometer pro Stunde. Nachdem die Entfernung zur Haltelinie gespeichert wurde (20 Meter im Beispiel), wird der Zeitstempel gespeichert. Dieser wird in den nächsten Schritten verwendet, um die vergangene Zeit von der letzten gespeicherten Rückstaulänge zu bestimmen. Der minimale Zeitraum zwischen der letzten gespeicherten und der nächsten zu betrachtenden Meldung

desselben Fahrzeugs ist frei wählbar. In der Auswertung der Messkampagnendaten wurde ein Zeitraum von 3 Minuten definiert. Das heißt, dass keine Meldungen auf diesem Straßenabschnitt betrachtet werden (roter Bereich) bis 3 Minuten seit der letzten gespeicherten Rückstaulänge vergangen sind bei einer LSA-Umlaufzeit von 85 Sekunden entspricht dies 2 Umläufen. Dies ist deshalb so wichtig weil bei einer höheren Verkehrsnachfrage vor der LSA, das Fahrzeug die Kreuzung während der ersten Grünphase möglicherweise nicht verlassen kann.

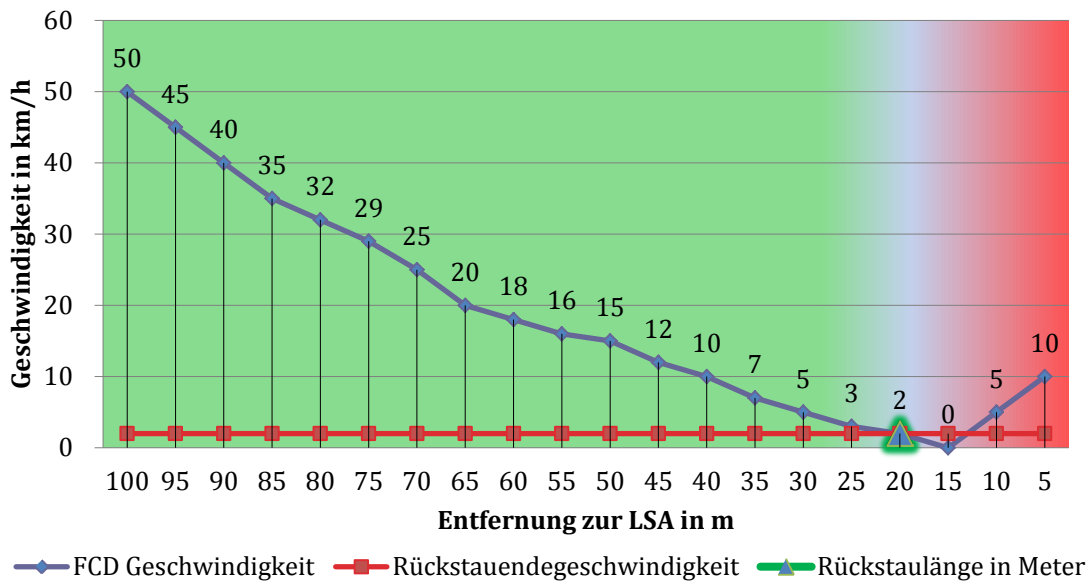


Diagramm 10. Beispiel der Funktionsweise des „SQLEstimators“ als Diagramm

Damit das Verfahren besser zu verstehen ist, werden einzelne Fälle in der Abbildung 27 veranschaulicht. In der Abbildung wird die Bewegung eines Messfahrzeugs innerhalb des gegebenen Straßenabschnitts vor der Lichtsignalanlage dargestellt. Hierbei werden der Zeitstempel und die Bewegungsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt der FCD-Meldung angezeigt. Darüber hinaus wird jedem Fall der Wert „true“ oder „false“ zugeordnet, der beschreibt, ob das jeweilige Fahrzeug als Rückstaulänge genommen wird oder nicht. Im Folgenden werden die einzelnen Fälle genauer betrachtet. Zu beachten ist, dass die Geschwindigkeitsparameter auf 2 Kilometer pro Stunde und der minimale Zeitraum zwischen zwei gültigen Meldungen auf 3 Minuten gesetzt sind.

Im Fall 1 ist das Fahrzeug zum ersten Mal auf den Straßenabschnitt mit einer Geschwindigkeit von 15 Kilometer pro Stunde eingefahren. Da die aktuelle Geschwindigkeit größer als der Geschwindigkeitsparameter ist, wird diese Meldung als ungültig im „SQLEstimators“ betrachtet. Im Fall 2 ist die Geschwindigkeit geringer geworden, die zugehörige Fahrzeugposition wird aber noch immer nicht im „SQLEstimators“ als Rückstauende betrachtet, da die Geschwindigkeit noch immer höher

als der Geschwindigkeitsparameter ist. Im Fall 3 wird die Entfernung zur LSA gespeichert, da die Geschwindigkeit unter dem Geschwindigkeitsparameter liegt und keine gültigen vorherigen Meldungen vorhanden sind. In dem Fall 4 fährt das Messfahrzeug zum zweiten Mal in den Straßenabschnitt ein und hält wegen des Rückstaus gleich am Anfang des Straßenabschnitts an. Da die vergangene Zeit länger als 3 Minuten ist und die Geschwindigkeit unter 2 km/h liegt, wird die entsprechende Entfernung zur Haltelinie berechnet und gespeichert.

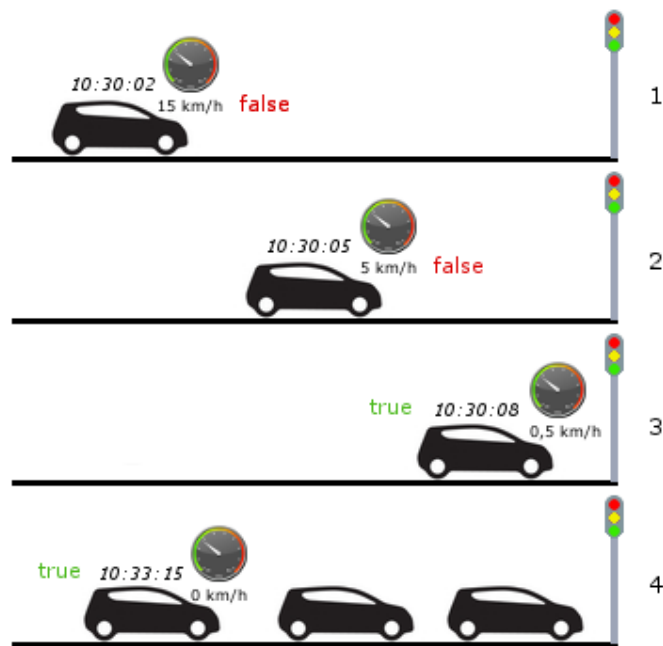


Abbildung 27. Betrachtung der Funktionsweise des „SQLEstimators“ anhand von vier Fällen

Der „SQLEstimator“ wurde in der Programmiersprache Java implementiert und mit dem „DPAnalyzer“ in ein Java-Programm zu Versuchszwecken zusammengeführt. Das Programm kann im Anhang unter dem Verzeichnis „Programm zur Rückstaulängenschätzung“ gefunden werden. Im nächsten Abschnitt wird die Funktionsweise des Programms erläutert.

5.2 Programm für die Rückstaulängenschätzung

Im Rahmen der Dissertation [30] von Dr. Thorsten Neumann wurde neben dem theoretischen Teil eine dazugehörige praktische Umsetzung des „DPAnalyzers“ realisiert. Dieses wurde als ein Java-basiertes Programm entwickelt. Darüber hinaus sollten alle Funktionalitäten des Rückstaulängenschätzers wie z.B. die a-priori Datenfusionsschnittstelle berücksichtigt werden.

Der optimierte „DPAnalyzer“ wurde mit dem „SQLEstimator“ zusammengeführt, um die Tests zu vereinfachen. Die beiden Rückstaulängenschätzer werden während einer

Schätzung parallel mit Daten (Entfernungen der „gematchten“ FCD-Meldungen von der Haltelinie) gefüllt. Damit das Programm an Geschwindigkeit gewinnt, werden die Matches³⁰ aus einer Datei zuerst in Objekte importiert. Nachdem alle Matches in den Objekten sind, werden nur die, die für die jeweilige Kreuzung wichtig sind, in ein „Intersection“-Objekt gespeichert. Das Objekt „Intersection“ besteht aus den vier Kreuzungsarmen mit dem jeweiligen Kanten. Ein Kreuzungsarm besteht in dieser Auswertung aus maximal 3 Kanten. Im nächsten Abschnitt wird die Vorgehensweise der Entfernungsbestimmung zum Streckenabschnittsanfang (Kreuzungsarmanfang) erläutert.

Berechnung der Entfernung vom Streckenabschnittsanfang

Während des Map-Matchings werden die Entfernungen vom Kantenbeginn berechnet, um die Position des Fahrzeugs zu diesem bestimmten Zeitpunkt zu kennen. Da bei den beiden Rückstaulängenschätzern die Entfernungen von der Haltelinie betrachtet werden, müssen diese vorher einmal bestimmt werden. In dieser Auswertung werden maximal 3 Kanten betrachtet, wobei der Straßenabschnitt prinzipiell aber variabel definiert werden kann.

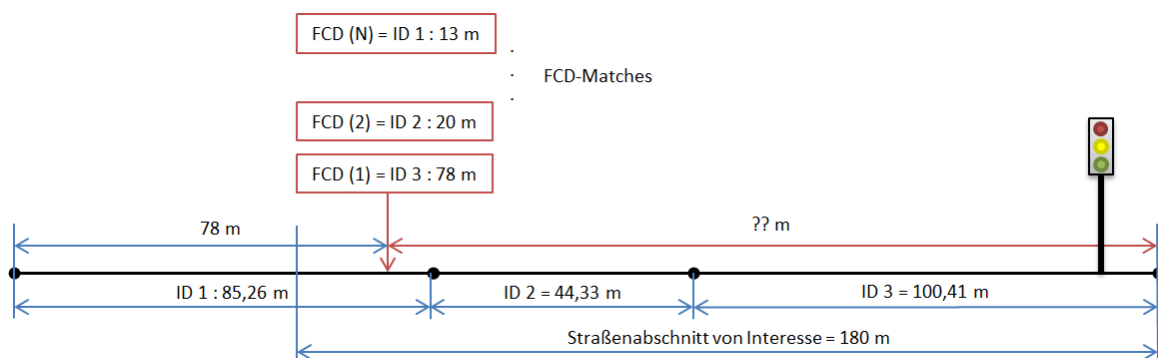


Abbildung 28. Problem der Berechnung der Entfernung vom Straßenabschnittbeginn

Die Abbildung 28 stellt das Problem graphisch dar. In den roten Kästchen befinden sich die FCD-Meldungen(Matches), zuerst die aktuelle, die betrachtet wird, und weitere, die auf die Berechnung in der Schlange stehen. Die einzelnen Kanten sind mit IDs und ihrer Länge gekennzeichnet. Die Länge des gesamten Kreuzungsarms beträgt 230 Meter, dennoch wird in diesem Fall nur ein Streckenabschnitt der Länge 180 Meter betrachtet. Um die Entfernung vom Streckenabschnittsanfang zu bestimmen, werden die Kanten in der Reihenfolge entsprechend des Straßenverlaufs in eine XML-Datei abgelegt, um die korrekte Reihenfolge der Kanten sicherzustellen. Im Beispiel der Abbildung 28 wurde an der Kante mit der ID 1 eine FCD-Meldung erhalten, die die Entfernung 78 Meter vom

³⁰ Als Matches werden die, mittels Map-Matching-Verfahren, auf die Karte zugeordnete FCD-Meldungen bezeichnet

Kantenbeginn enthält. Bevor die Berechnung der Entfernung stattfinden kann, werden die Längen der beiden vorherigen Kanten zusammengerechnet. Diese können anschließend von der Gesamtlänge des Streckenabschnitts abgezogen werden. Die Restlänge wird zur Berechnung der minimalen Entfernung vom Kantenbeginn für die Kante mit der ID 1 eingesetzt. Nachdem alle Referenzwerte berechnet sind, findet die eigentliche Berechnung der Entfernung vom Streckenabschnittsbeginn statt. Zuerst wird überprüft, ob die FCD-Meldung im Bereich des Streckenabschnitts liegt, das heißt, es wird geprüft, ob die Entfernung vom Kantenbeginn größer oder gleich der minimalen Entfernung ist. Die folgende Herleitung zeigt die Berechnung der Referenzwerte für die Kante mit der ID 1 aus dem Beispiel der Abbildung 28:

1. *Kantenlängensumme (ID 2, ID 3)* = $44,33\text{ m} + 100,41\text{ m} = 144,74\text{ m}$

2. *Restlänge* = $180\text{ m} - 144,74\text{ m} = 35,26\text{ m}$

3. *minimale Entfernung* = $85,26\text{ m} - 35,26\text{ m} = 50\text{ m}$

Wenn die Länge vom Kantenbeginn länger als die minimale Entfernung ist, wird die Länge vom Kantenbeginn zur Längen vom Kantenende umgerechnet. Diese wird anschließend mit der Kantenlängensumme zusammengerechnet. In anderen Worten beträgt die Entfernung vom Streckenabschnittsbeginn im Beispiel der Abbildung 28 folgende Werte:

4. *Invertierte Entfernung von Kantenbeginn* = $85,26\text{ m} - 78\text{ m} = 7,26\text{ m}$

5. *Entfernung vom Streckenabschnittsbeginn* = $7,26\text{ m} + 144,74\text{ m} = 152\text{ m}$

Die Entfernung vom Streckenabschnittsbeginn kann mittels des vorliegenden Ansatzes berechnet werden, auch wenn die Entfernung zur Haltelinie unbekannt ist. Da die Entfernung zur Haltelinie der eigentlich gesuchte Wert ist, wird im nächsten Abschnitt erläutert, wie diese bestimmt werden kann.

Berücksichtigung der Haltelinienentfernung vom Kantenbeginn

Da die Straßennetze als miteinander korrelierende Knoten und Kanten dargestellt werden, wird die Haltelinie nicht als Kantenende gesetzt. Das bedeutet, dass die Kante meistens bis zur Mitte der Kreuzung reicht wo sie mit einem gemeinsamen Knoten von mehreren Kanten verbunden wird. Die Entfernung der Haltelinie zum Kantenende beträgt in den meisten Fällen zwischen 15 und 20 Meter. Aufgrund der möglichen falschen Ergebnisse sollten diese Entfernungen in der Schätzung berücksichtigt werden.

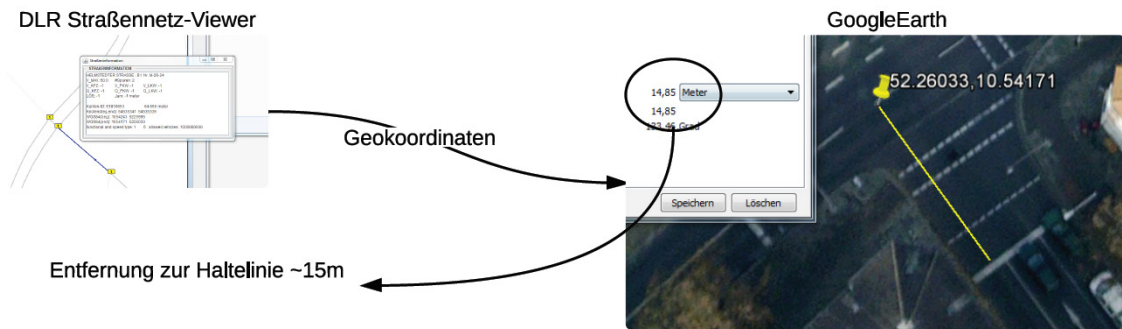


Abbildung 29. Bestimmung der realen Haltelinienentfernung

Der Abzug der bestimmten Entfernung zwischen Haltelinie und Kantenende direkt nach der Schätzung kann aufgrund der Funktionsweise des DPAnalyzers zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Also muss die Entfernung vor der Schätzung von den Daten abgezogen werden, da dies ansonsten zu Abweichungen im Ergebnis führen kann. Wie diese möglichen Fehler eliminiert werden, wird in den nächsten Sätzen und der Abbildung 29 mit der Beschreibung der Vorgehensweise der Bestimmung der Haltelinienentfernung erläutert. Wegen der Unterschiede in Straßennetzen einzelner Anbieter können die Entfernungen nicht direkt in GoogleEarth [47] abgelesen werden, da hier bspw. DLR-intern das Straßennetz von Navteq³¹ verwendet wurde. In Straßennetzen von unterschiedlichen Anbietern können die Kanten und Knoten verschoben sein, was dazu führt, dass sich dieselben Kanten oder Knoten nicht an derselben Stelle befinden. Deshalb wurden zuerst die Geokoordinaten des Kantenendpunkts aus dem Navteq-Netz abgelesen und in GoogleEarth gesucht. Da GoogleEarth eine Satellitenansicht anbietet, ist es einfach die Haltelinie zu erkennen und die Distanz zwischen der Geokoordinate des Kantenendpunkts und der Haltelinie zu bestimmen. In Abbildung 29 wird die Vorgehensweise verdeutlicht.

Vorbereitung der Auswertung

Um die Auswertung optimal zu gestalten und in so wenigen Schritten wie möglich zu einer aussagekräftigen graphischen Darstellung der Ergebnisse zu gelangen, wurden die Rückstauschätzverfahren und die realen Daten in ein Java-Programm zusammengeführt. Die Idee dahinter ist es, die Daten parallel auszuwerten und in einem Diagramm darzustellen. Für die graphische Darstellung wurde die „JFreeChart“³² Java-Bibliothek verwendet. Somit können mehrere Tests und Visualisierungen schnell und effektiv durchgeführt werden. Die Daten werden in einem Diagramm dargestellt, damit ein direkter

³¹ Navteq ist ein U.S. Amerikanischer Anbieter von geographischen Informationssystemen.

³² JFreeChart ist eine kostenlose Java-Bibliothek, die der einfachen Erzeugung von Professionellen Diagrammen dient.
[48]

Vergleich zwischen den realen Daten und den geschätzten möglich ist. Der Datenfluss für die Rückstaulängenschätzung ist in Abbildung 30 verbildlicht.

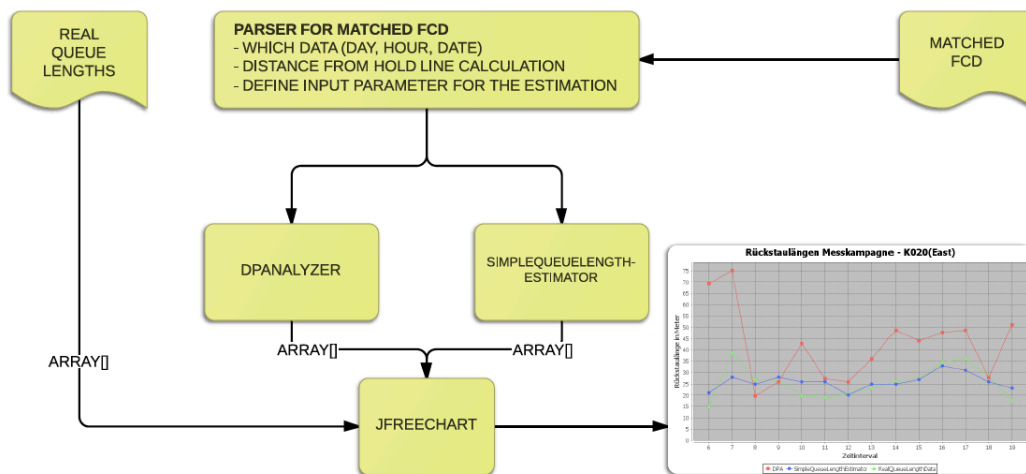


Abbildung 30. Datenfluss der Rückstaulängenschätzung mit anschließender graphischer Darstellung

Im Rahmen der Auswertungsvorbereitung wurde ein Parser für die Angabe von Parametern und die Berechnung der Haltelinienentfernung entwickelt. Dabei dient der Parser vor allem wie eine Schnittstelle zwischen den „gematchten“ FCD und den beiden Rückstaulängenschätzern. Der Parser und das komplette Programm können im Anhang unter dem Verzeichnis „Programm zur Rückstaulängenschätzung“ gefunden werden.

5.3 Potentialanalyse von hochfrequenten FCD in der Rückstaulängenschätzung

In diesem Abschnitt werden die hochfrequenten FCD näher betrachtet, um festzustellen welches Potential diese Daten innerhalb der Rückstaulängenschätzung haben. Dabei werden die verwendeten Parameter zur Rückstaulängenschätzung dynamisch verändert, um das Potential der Schätzer mit unterschiedlichen Werten zu testen. Bevor die ersten Ergebnisse vorgestellt werden, soll bemerkt werden, dass der „DPAnalyzer“ prinzipiell nicht für die Rückstaulängenschätzung mit hochfrequenten Daten sondern für Taxi-FCD (Meldehäufigkeit üblicherweise >30 Sekunden) entwickelt wurde. Trotzdem wird in dieser Arbeit versucht, das Potential des Verfahrens mittels hochfrequenter FCD zu prüfen. In der Auswertung der hochfrequenten FCD werden nur zwei Messkampagentage (erster und dritter) berücksichtigt, da die FCD der weiteren Tage für die Auswertung ungeeignet sind. Aus den Daten des zweiten Tages der Messkampagne, die an der Kreuzung K047 südlicher Kreuzungsarm stattgefunden hat, waren die Videodaten wegen der großen Entfernung vom Kreuzungsarm sehr schwer zu bewerten. Aufgrund dessen konnten keine genauen realen Rückstaulängen abgelesen werden. Die Daten des letzten Tages der

Messkampagne waren aufgrund geringer Staubildung an der betrachteten Kreuzung (K029 südlicher Kreuzungsarm) leider nicht zu verwenden.

5.3.1 Schätzergebnisse ohne Datenfusion

Nachdem die Datenauswertung und das Java-Programm zur Auswertung fertig gestellt wurden, konnten erste Ergebnisse erzielt werden. Wie im vorherigen Abschnitt erläutert wurde, werden für die Auswertung die realen, die „DPAnalyzer“-geschätzten und die „SQLEstimator“-geschätzten Rückstaulängen in einem Diagramm parallel dargestellt. Die Daten für die erste Auswertung fließen in die Rückstaulängenschätzer ohne weitere Datenfusion. Es werden nur die Haltelinienabstände berücksichtigt.

Kreuzung K020 – östlicher Kreuzungsarm

Das Ergebnis in Diagramm 11 zeigt, dass der „SQLEstimator“ eine gute Korrelation mit den realen Rückstaulängen liefert. Außerdem ist der Verlauf der Kurve dem Verlauf der realen Rückstaulängen sehr ähnlich. Der größte Fehler liegt bei einem Wert von -10,6 Metern. Im Gegensatz zum „SQLEstimator“ zeigt der „DPAnalyzer“ an einigen Stellen große Abweichungen von den realen Rückstaulängen. Vor allem ist der Ausreißer am Morgen in der Stunde 7 mit einem Schätzfehler von +36,4 Metern auffällig. Weiterhin sind die Schätzfehler für die Stunden 10 und 19 bemerkenswert.

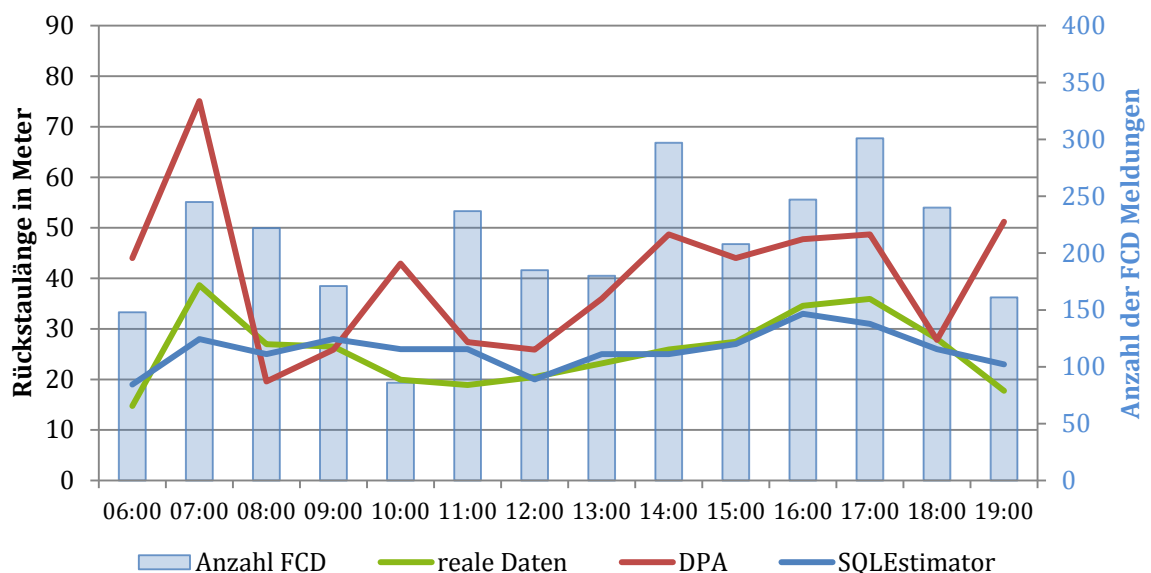


Diagramm 11. Geschätzte Rückstaulängen für die Kreuzung K020 – östlicher Kreuzungsarm

Im Diagramm 12 ist der Schätzfehler in Fahrzeuglängen graphisch dargestellt. Im betrachteten Beispiel ist deutlich zu sehen, dass eine höhere Anzahl von FCD-Meldungen nicht zwangsläufig zum besseren Ergebnis führt. Eine niedrige Anzahl von FCD-Meldungen kann, vor allem bei dem „DPAnalyzer“, zu einem höheren Schätzfehler führen,

was im Beispiel in der Stunde 10 deutlich zu sehen ist. Am auffälligsten sind die Schätzfehler am Morgen und Abend.

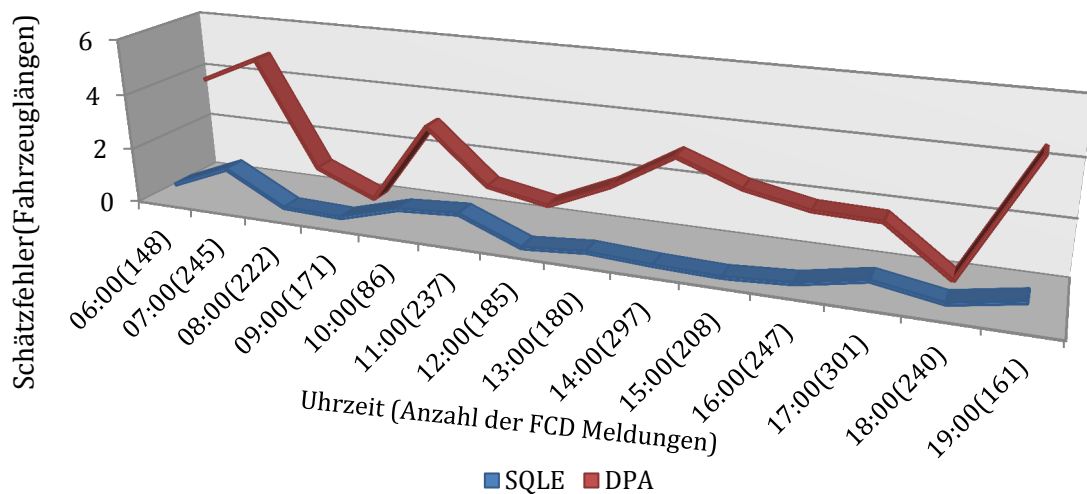


Diagramm 12. Schätzfehler in Fahrzeuglängen mit der Angabe von Verfügbaren FCD Meldungen für die jeweilige Stunde – K020

Kreuzung K047 – westlicher Kreuzungsarm

Die Schätzergebnisse im Diagramm 13 weisen zwei Ausreißer bei der Schätzung des „DPAnalyzers“ im Vergleich zu den realen Rückstaulängen auf. Die weiteren Schätzergebnisse des „DPAnalyzers“ zeigen einen direkten Zusammenhang zu dem realen Tagesgang. Nichtsdestotrotz sind an einigen Stellen höhere Schätzfehler zu bemerken. Im Gegensatz zum Schätzergebnis des „DPAnalyzers“ bildet der Kurvenverlauf der Schätzung des „SQLEstimators“ den Verlauf der realen Rückstaulängen gut nach.

Die Anzahl der FCD-Meldungen für diese Kreuzung ist deutlich niedriger als bei der Kreuzung K020, was sicherlich ein Grund für die Ausreißer in der Schätzung des „DPAnalyzers“ sein wird. Wie im Abschnitt „Untersuchung der Abweichungsursachen“ ab Seite 60 näher dargestellt, sind die FCD-Meldungen sehr verstreut auf dem Kreuzungssegment liegen. Das heißt, dass zwischen den Anhäufungen der FCD-Meldungen ein großer Bereich existiert, der die Rückstaulängenschätzung im „DPAnalyzer“ offensichtlich sehr beeinflusst. In diesem Fall ist auffällig, dass der Schätzfehler beim „DPAnalyzer“ von der Anzahl der FCD-Meldungen stark abhängt. Je geringer die Anzahl der verfügbaren FCD ist, desto größer die Abweichungen.

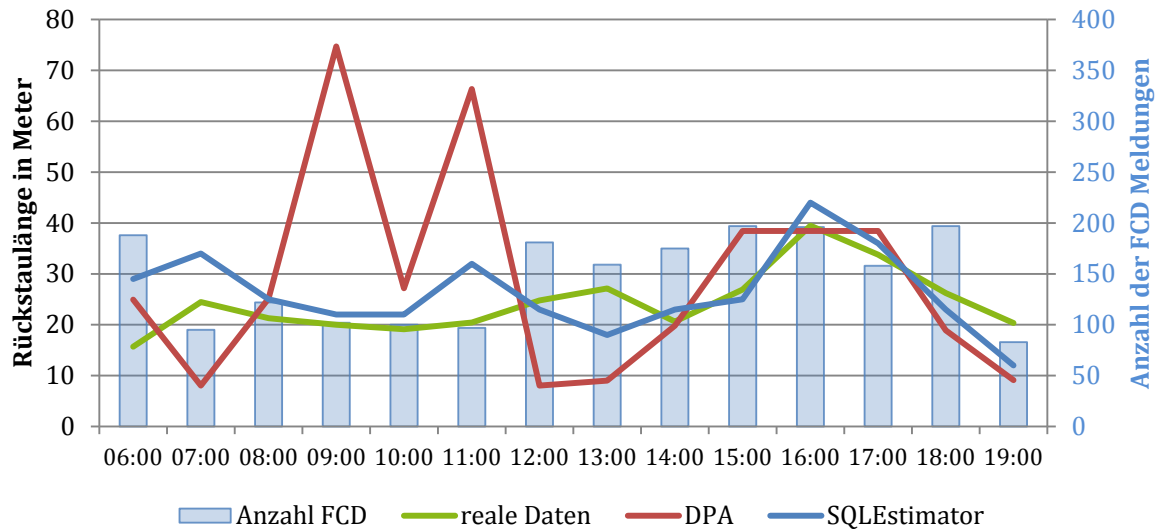


Diagramm 13. Geschätzte Rückstaulängen für die Kreuzung K047 – westlicher Kreuzungsarm

Im Diagramm 14 sind die Schätzfehler für die Kreuzung K047 in Fahrzeuglängen dargestellt. Der Schätzfehler des „DPAnalyzers“ beträgt an einer Stelle fast 8 Fahrzeuglängen und weicht damit signifikant von den realen Rückstaulängen ab. Diese Stellen der extremen Abweichungen können an einzelnen Anhäufungen von FCD-Daten liegen (Diagramm 15). Der „SQLEstimator“ liefert in diesem Beispiel wieder kleine Abweichungen von den realen Daten, was zum Rückschluss führt, dass das Verfahren mit einer kleinen und einer hohen Anzahl von hochfrequenten FCD gute Ergebnisse liefern kann.

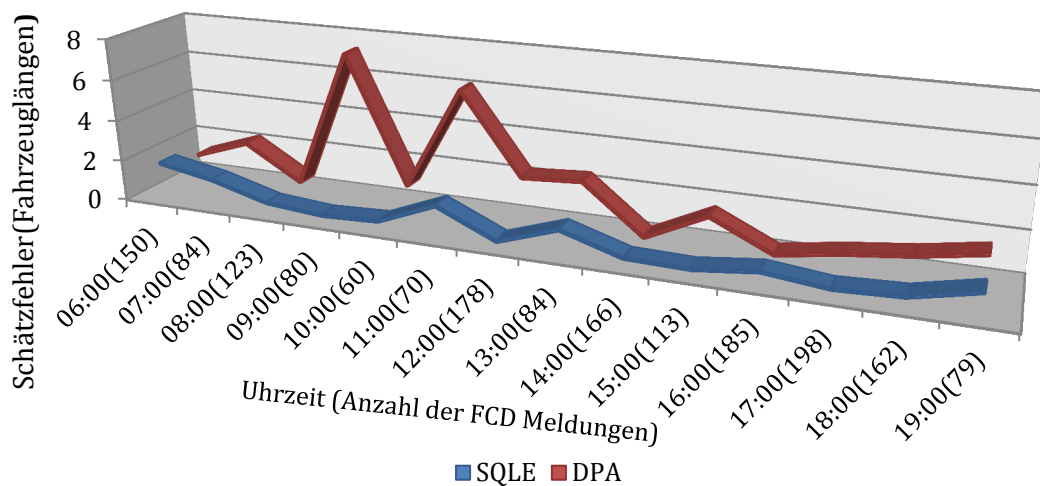


Diagramm 14. Schätzfehler in Fahrzeuglängen mit der Angabe von Verfügbaren FCD Meldungen für die jeweilige Stunde – K047

Analyse der ersten Ergebnisse und Verbesserungsmöglichkeiten

Die ersten Ergebnisse der Rückstaulängenschätzung mit hochfrequenten FCD zeigen an einigen Stellen Abweichungen der geschätzten Rückstaulängen des „DPAnalyzers“ im Vergleich zu den realen Rückstaulängen. Einerseits ist das zu erwarten, da der „DPAnalyzer“ nicht für die Rückstaulängenschätzung mittels hochfrequenter FCD entwickelt wurde. Die Idee hinter dem „DPAnalyzer“ ist es, mit so wenigen Daten wie möglich die durchschnittlichen Rückstaulängen zu bestimmen. Dies basiert auf Taxi-FCD, die meistens im Intervall von >30 Sekunden gesendet werden. Um das Potential des „DPAnalyzers“ weiterhin zu prüfen, wird eine Potentialanalyse mit Taxi-FCD im Abschnitt 5.4 betrachtet.

Im Gegensatz zu den Schätzungen des „DPAnalyzers“ zeigen die Ergebnisse des „SQLEstimators“ eine zufriedenstellende Nachbildung der realen Rückstaulängen. Dabei sind die Abweichungen minimal und die Kurvenverläufe annähernd gleich. Dies führt zu der Erkenntnis, dass bei einer Rückstaulängenschätzung mit hochfrequenten FCD nicht unbedingt ein komplexes Verfahren benötigt wird, um gute Schätzungen zu erzielen.

Untersuchung der Abweichungsursachen

Um die Ursache der Schätzfehler besser untersuchen zu können, wurden die FCD-Meldungen stundenweise ausgewertet und in Diagrammen dargestellt. Dabei können Abweichungen in den Meldungen wahrgenommen werden. So können z.B. Anhäufungen von FCD-Meldungen weit entfernt von der Haltelinie eine Ursache für die starken Abweichungen der Schätzungen sein. Somit könnten auch fehlerhafte FCD-Meldungen erkannt werden. Als fehlerhaft werden die FCD-Meldungen bezeichnet, die z.B. bei einem GPS-Signalverlust oder beim Einparken erzeugt werden. Da es bei der Rückstaulängenschätzung an der Kreuzung K020 eine große Abweichung zwischen den geschätzten und realen Rückstaulängen um 7 gab, wird diese als Beispiel genommen. Im Diagramm 15 ist die Verteilung der FCD-Meldungen dargestellt. Es ist eine Anhäufung von 30 FCD-Meldungen erkennbar, die sich weit entfernt von der Haltelinie befindet. Diese ist möglicherweise bei einer LSA-Schaltphase entstanden, in der eine große Verkehrsmenge zugeflossen ist.

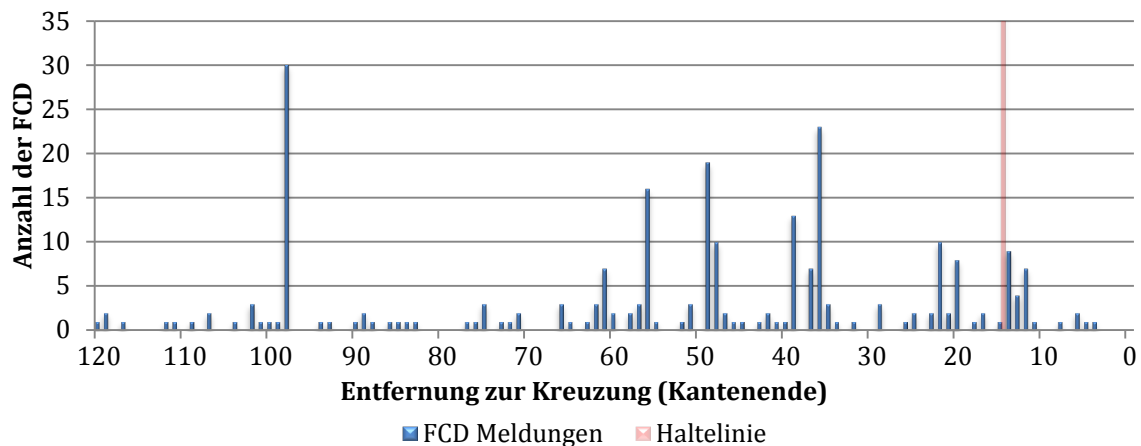


Diagramm 15. Verteilung der FCD Meldungen innerhalb Stunde 7 vor der LSA an der Kreuzung K020 östlicher Kreuzungsarm

Damit sichergestellt wird, dass diese Meldungen keinen GPS-Fehler oder eine andere Art von Fehler besitzen, wurde in den Videodaten eine Prüfung vorgenommen. Zuerst wurde innerhalb der FCD die Uhrzeit ermittelt, zu der sich diese Anhäufung gebildet hat. Dabei wurde die Stelle gesucht, wo sich die Matches auf einer der Kanten des betrachteten Kreuzungsarms länger aufhielten. In der Abbildung 31 wird die bestimmte Stelle der Anhäufungen von FCD aus dem Diagramm 15 dargestellt. Aus den Trajektorien der Fahrzeuge wird deutlich, dass das Fahrzeug um 07:36:48 auf die Kante 51810654 eingefahren ist und sich dabei mit einer Geschwindigkeit von ~11 km/h bewegt hat. Außerdem ist das Fahrzeug um 07:36:54 stehen geblieben. Die Entfernung vom Kantenbeginn betrug zu diesem Zeitpunkt 34 Meter. Das Fahrzeug hat sich nach 58 Sekunden um 07:37:52 weiter bewegt. Aufgrund des Intervalls der FCD-Meldungen von 2 Sekunden sind das genau die 30 FCD-Meldungen, die im Diagramm 15 herausstechen.

KantenID	FahrzeugID	Offset vom Kantenbeginn	Zeitstempel	Geschwindigkeit(km/h)
51810655	6	116	22.08.2013 07:36:46	12,48
51810654	6	11	22.08.2013 07:36:48	11,36
51810654	6	23	22.08.2013 07:36:50	7,80
51810654	6	30	22.08.2013 07:36:52	2,98
51810654	6	34	22.08.2013 07:36:54	0,23
51810654	6	34	22.08.2013 07:36:56	0,19
51810654	6	34	22.08.2013 07:36:58	0,10
51810654	6	34	22.08.2013 07:37:00	0,00
⋮				
51810654	6	34	22.08.2013 07:37:50	0,00
51810654	6	34	22.08.2013 07:37:52	5,06
51810654	6	39	22.08.2013 07:37:54	9,48
51810654	6	48	22.08.2013 07:37:56	9,11
51810654	6	57	22.08.2013 07:37:58	9,68
51810654	6	66	22.08.2013 07:38:00	8,17
51810653	6	5	22.08.2013 07:38:02	7,28

Abbildung 31. Untersuchung der FCD Anhäufungen

Trotz dieser Informationen ist noch nicht sichergestellt, ob diese Meldungen aufgrund eines GPS- oder Map-Matching Fehlers entstanden sind oder nicht. Da während der Messkampagne auch Kameradaten erfasst wurden, kann daraus die Lage des Verkehrs zum gegebenen Zeitpunkt mit den Matches abgeglichen werden. In der Abbildung 32 ist die Videodatenuntersuchung dargestellt. In diesem Beispiel wurden zwei Kameras, die mittlere und die linke, als Referenz für die reale Verkehrslage herangezogen. In den Bildern wird erkennbar, dass die Verkehrsnachfrage zu diesem Zeitpunkt sehr hoch war. Außerdem ist das Messfahrzeug, das mit „M“ gekennzeichnet ist, ungefähr an der Position, der es in den Matches zugeordnet ist. Dies ist nur ein Beispiel der Untersuchung. Da mehrere Stellen existieren, an denen Anhäufungen weit entfernt von der Haltelinie vorkommen, wurden diese mit dem gleichen Ansatz untersucht.



Abbildung 32. Untersuchung der Abweichungen mittels Videodaten

Um die Ergebnisse des „DPAnalyzers“ zu verbessern, wird die im Rahmen der Entwicklung bereitgestellte Datenfusionsschnittstelle appliziert. Die Datenfusionsschnittstelle ist dynamisch gestaltet und kann über mehrere Verkehrskennzahlen erfolgen. Aufgrund der verfügbaren Taxi-FCD sind die durchschnittlichen Reisezeiten bekannt, so dass diese als Verlustzeiten berechnet und für die Datenfusion verwendet werden können. Im nächsten Abschnitt werden die Datenfusion, die Berechnung der Verlustzeiten und resultierende Ergebnisse detailliert vorgestellt.

5.3.2 DPAnalyzer-Datenfusion und Betrachtung der neuen Ergebnisse

Die Datenfusion erfolgt über die Datenfusionsschnittstelle des „DPAnalyzers“. Dafür soll eine geeignete Verkehrskenngröße eingesetzt werden, die in der

Rückstaulängenschätzung von Nutzen ist. Im Rahmen dieser Auswertung werden die Verlustzeiten, die aus den hochfrequenten FCD der Messkampagne abgeleitet werden können, zur Verbesserung der Schätzung des „DPAnalyzers“ verwendet. Zuerst werden die Reisezeiten aus den realen Daten bestimmt. Dabei wird nur der Streckenabschnitt am betrachteten Kreuzungsarm zur Berechnung genommen. In den folgenden Abschnitten werden die Formeln und Vorgehensweisen zur Berechnung der Kenngrößen erläutert.

5.3.2.1 Bestimmung der realen Reisezeiten

Die Reisezeit ist die Zeit, die ein Objekt von einem Startpunkt bis zum Endpunkt benötigt. In diesem Fall ist es die Zeit, die das Messfahrzeug braucht, um die Strecke zwischen zwei Geopositionen zurückzulegen. Dieser Vorgang ist in Abbildung 33 graphisch dargestellt.

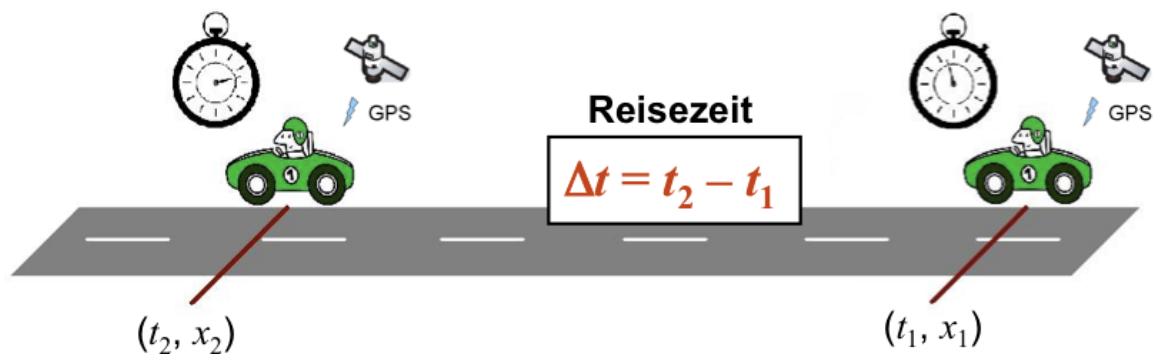


Abbildung 33. Reisezeitenberechnung mittels FCD

Quelle: [22]

Zur Bestimmung der Reisezeiten werden alle Positionen in den Matches mit Hilfe des TravelTimeParsers³³ geparkt und der Zeitpunkt gespeichert, zu welchem das Fahrzeug in eine bestimmte Kante einfährt. Danach werden die Daten weiter geparkt bis diese Kante vom Fahrzeug wieder verlassen wird. Die Zeit zwischen diesen zwei Werten ist die reale Reisezeit. Natürlich können auch größere Straßenabschnitte definiert werden, wobei mehrere Kanten erfasst werden. Die Abbildung 34 stellt die Berechnung der Verlustzeiten aus einem Matches-Dokument dar.

³³ TravelTimeParser ist ein im Rahmen dieser Arbeit entwickelter Parser zur Bestimmung der Reisezeiten. Der Parser kann im Anhang unter dem Verzeichnis „Reisezeiten“ gefunden werden.


KantenID	FahrzeugID	Offset vom Kantenbeginn	Zeitstempel	Reisezeit
51810655	13	108	22.08.2013 09:24:51	 $\Delta t = 26 \text{ s}$
51810654	13	12	22.08.2013 09:24:53	
51810654	13	31	22.08.2013 09:24:55	
51810654	13	50	22.08.2013 09:24:57	
51810654	13	66	22.08.2013 09:24:59	
51810653	13	12	22.08.2013 09:25:01	
51810653	13	19	22.08.2013 09:25:03	
51810653	13	21	22.08.2013 09:25:05	
51810653	13	21	22.08.2013 09:25:07	
51810653	13	21	22.08.2013 09:25:09	
51810653	13	21	22.08.2013 09:25:11	
51810653	13	22	22.08.2013 09:25:13	
51810653	13	27	22.08.2013 09:25:15	
51810653	13	38	22.08.2013 09:25:17	
51810653	13	53	22.08.2013 09:25:19	
750220145	13	4	22.08.2013 09:25:21	

Abbildung 34. Beispiel der Reisezeitenberechnung aus dem Matches-Dokument

Anschließend werden die Werte stundenweise zusammengerechnet, und eine durchschnittliche Reisezeit daraus bestimmt.

5.3.2.2 Berechnung der Referenzverlustzeiten

Nachdem die realen Reisezeiten Δt bestimmt wurden, kann die Verlustzeit sehr einfach abgeleitet werden. Die Formel zur Berechnung der Verlustzeit lautet:

$$d = \Delta t - \Delta t_{\min} \quad 5.1$$

Die Verlustzeit oder der sogenannte „delay“ wird durch d repräsentiert. Die minimal zulässige Reisezeit Δt_{\min} lässt sich wie folgt berechnen:

$$\Delta t_{\min} = \frac{v_{\max}}{l} \quad 5.2$$

Die minimale Reisezeit berechnet sich demnach aus der Division der maximalen Geschwindigkeit v_{\max} geteilt durch die Länge l des betrachteten Abschnitts. Dies ist die Reisezeit, die ohne Unterbrechungen und mit der maximalen zulässigen Geschwindigkeit erfolgt. In diesem Fall der Messkampagne war die maximale Geschwindigkeit bei 50 Kilometer pro Stunde. Da für die Datenfusion ein Wert in Sekunden benötigt wird, ist die Geschwindigkeit in Meter pro Sekunde zu berechnen:

$$v_{\max} = 50(\text{km/h}) = \frac{50\,000}{3\,600} = 13,88(\text{m/s}) \quad 5.3$$

Die Länge des betrachteten Straßenabschnitts beträgt 120 Meter. Die Berechnung der minimalen Reisezeit Δt_{\min} ist demzufolge:

$$\Delta t_{min} = \frac{120}{13,88} = 8,64(s) \quad 5.4$$

Das Diagramm 16 zeigt die berechneten Reise- und Verlustzeiten an der Kreuzung K020-Osten mit den während der Messkampagne erhobenen Daten. Darüber hinaus werden diese Zeiten mit der Anzahl der FCD-Meldungen für die jeweilige Stunde verglichen. Bei Analyse des Diagramms sind Korrelationen zwischen den Zeiten und der Anzahl der FCD-Meldungen zu erkennen. Der Grund dafür liegt darin, dass das Messfahrzeug im Stau gestanden hat und deshalb mehrere Meldungen am selben Straßenabschnitt gespeichert wurden. An einigen Stellen ist diese Aussage nicht zutreffend. Wenn z.B. die Ergebnisse für 9 Uhr betrachtet werden, ist erkennbar, dass wenige FCD-Meldungen vorhanden sind, aber trotzdem hohe Reisezeiten berechnet wurden. Dies liegt an der Verteilung der Messdaten, da keine feste Anzahl von Durchläufen für den Straßenabschnitt pro Stunde definiert wurde. In der Realität wurden 4 bis 11 Messdurchläufe pro Stunde durchgeführt.

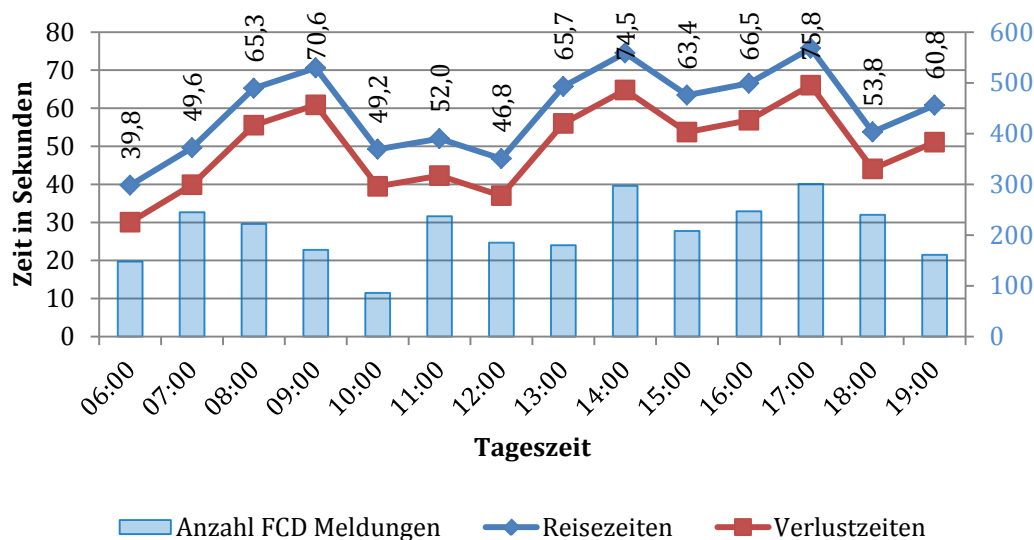


Diagramm 16. Reise- und Verlustzeiten im Vergleich zu der Anzahl der FCD Meldungen – Kreuzung K020

5.3.2.3 Berechnung der „DPAnalyzer“-basierten Verlustzeiten

Eine andere Weise der Berechnung von Verlustzeiten als oben erwähnt wird innerhalb des „DPAnalyzers“ verwendet. Die Berechnung der Verlustzeiten benötigt keine Informationen über die Positionen des Fahrzeugs, weil diese auf den durchschnittlichen Rückstaulängen bei einer gewissen Zuflusswahrscheinlichkeit basiert. Die Zuflusswahrscheinlichkeit q ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug während der nächsten Sekunde in den bestimmten Straßenabschnitt einfließt. Der Wert liegt innerhalb der Grenzen von 0 bis 1. Mittels folgender Formel wird die Verlustzeit innerhalb des „DPAnalyzers“ berechnet (vgl. [15]):

$$d(q) = \frac{r}{L_{\max}} \left(\frac{N}{s(g)} - \frac{r+1}{2(g+r)} \right) \cdot L(q) + \frac{r(r+1)}{2(g+r)} \quad 5.5$$

$d(q)$ = Funktion zur Berechnung der Verlustzeiten basierend auf den Rückstaulängen

r = Rotphasendauer in Sekunden

g = Grünphasendauer in Sekunden

L_{\max} = maximale Rückstaulänge im Gesamtsegment in Zellen (1 Zelle = 7,5 Meter)

N = betrachtete Streckenabschnittslänge in Zellen

$s(g)$ = maximale Anzahl von Fahrzeugen, die die Haltelinie während einer Grünphase passieren können

$L(q)$ = betrachtete durchschnittliche Rückstaulänge in Zellen

Definition des Suchbereichs

Zuerst werden die durchschnittlichen und maximalen Rückstaulängen und die Dichtepprofile für alle, wie im Kapitel 2.2.2 erklärt ist, berechnet. In diesem Beispiel wird die Länge des Vektors der Zuflusswahrscheinlichkeiten auf 600 gesetzt, was dazu führt, dass 600 unterschiedliche Rückstaulängen (maximale und durchschnittliche) und Dichtepprofile berechnet werden. Nachdem diese Werte berechnet wurden, wird die Formel für die Verlustzeitberechnung eingesetzt, um für jede durchschnittliche Rückstaulänge (600) eine Verlustzeit zu berechnen.

Die reale Verlustzeit wird mit den DPAnalyzer-Verlustzeiten abgeglichen, wobei das erste Dichteprofil gesucht wird, für das die Werte (Verlustzeiten) übereinstimmen. Dieses Dichteprofil wird gespeichert und im Vektor der Zuflusswahrscheinlichkeiten gesucht. Abbildung 35 veranschaulicht diese Vorgehensweise. Im Beispiel beträgt die reale Verlustzeit 20.0 Sekunden. Nachdem das Dichteprofil im Vektor der Zuflusswahrscheinlichkeiten gefunden wurde, werden die Gewichte mit gleichem Index entsprechend der gespeicherten Position innerhalb eines definierten Bereiches auf 1 gesetzt. Der Wert der diesen Bereich definiert, ist der Toleranzwert q_{tol} . (vgl. [14] S. 55)

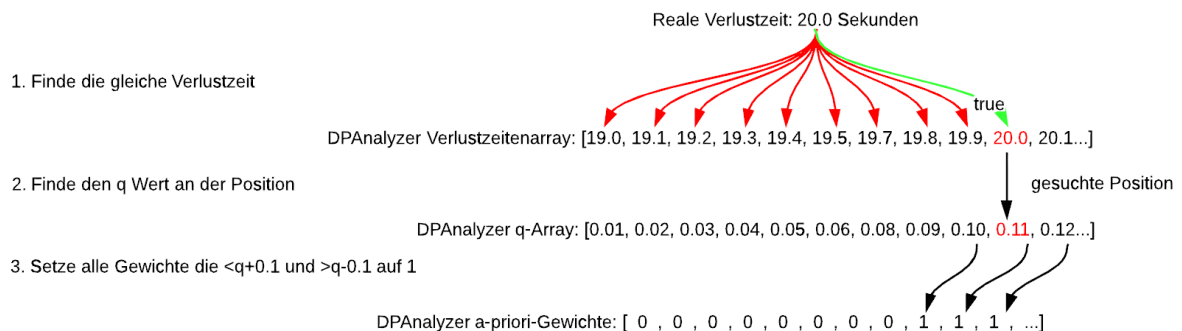


Abbildung 35. „DPAnalyzer“ verlustzeitbasierte Datenfusion

Je kleiner q_{tol} ist, desto kleiner ist der Suchhorizont und umgekehrt. Das liegt daran, dass danach eine kleinere Anzahl an Gewichten auf 1 gesetzt wird. Die Gewichte dienen der Begrenzung des Ergebnishorizonts. Das heißt, dass ein Bereich im Vektor der Dichteprofile definiert wird, an dem der „DPAnalyzer“ nach durchschnittlichen Rückstaulängen suchen sollte. Alle Rückstaulängen, die außerhalb des Horizonts liegen, werden nicht betrachtet. Aufgrund dessen wird das Rauschen im Ergebnis der Schätzung des „DPAnalyzers“ reduziert. Die Diagramm 17 a) und b) zeigen die Verbesserung des Ergebnisses durch den Einsatz von Datenfusion. In den Diagrammen wird eine Kurve dargestellt, die die Über- und Untersättigung definiert. Das Diagramm 17 a) zeigt die Streuung der Schätzungen ohne Datenfusion und das Diagramm 17 b) mit einer Datenfusion. Die hellblauen Punkte stellen die geschätzten Rückstaulängen für alle Zuflusswahrscheinlichkeiten dar. Darüber hinaus zeigt die Kurve einen Zwischenbereich bzw. die normale Verkehrslage. Aus den Diagrammen ist erkennbar, dass die Schätzung durch die Definition des Suchbereichs deutlich verbessert werden kann.

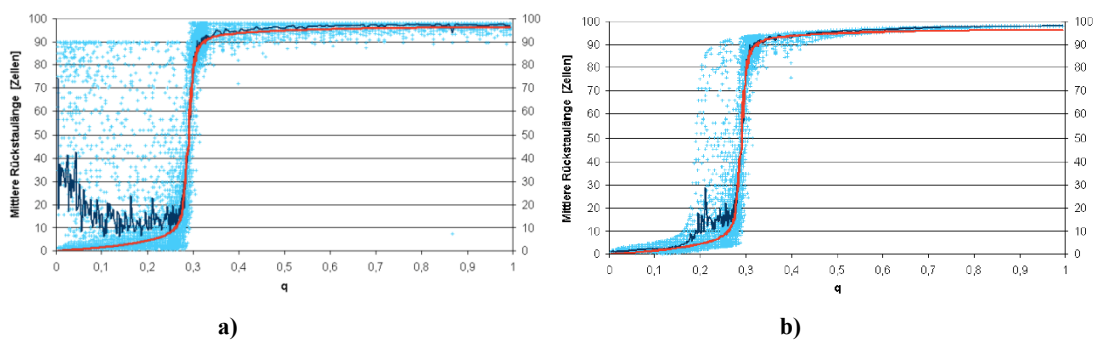


Diagramm 17. Ein Beispiel der Begrenzung des Ergebnishorizonts mit Einsatz von Datenfusion

Rote Linie: Simulierte durchschnittliche Rückstaulänge

Blaue Linie: Geschätzte durchschnittliche Rückstaulänge

Quelle: [14]

Eine wichtige Anmerkung ist, dass die Reisezeiten, die mit der „DPAnalyzer“-Formel berechnet werden, den Wert von 29 Sekunden nicht unterschreiten. Dies gilt nur für die konkreten Grün- und Rotzeiten die für diese Auswertung eingesetzt wurden. Aufgrund dessen werden die Gewichte an den Stellen, an denen die realen Reiserzeiten kleiner als die DPA-Reisezeiten sind, auf den kleinsten Wert gesetzt, das heißt auf 29 Sekunden.

5.3.2.4 Schätzergebnisse mit Datenfusion

Durch den Einsatz von Datenfusion sollte das Schätzergebnis des „DPAnalyzers“ deutlich verbessert werden. Die Reduktion des Detektionsbereichs hilft dem „DPAnalyzer“ bei der Schätzung, da es die Anzahl der möglichen Ergebnisse reduziert und einen bestimmten Bereich definiert wo der „DPAnalyzer“ suchen soll. Ziel ist es die extremen Abweichungen

bei den Schätzergebnissen zu vermeiden. Wie in Abschnitt 5.3.2.2 erwähnt, wurden die Verlustzeiten aus den Messkampagnendaten für die Datenfusion berechnet. In den Diagrammen, die in diesem Kapitel zu finden sind, ist das Schätzergebnis des „SQLEstimators“ transparent dargestellt, damit die Datenfusionsergebnisse des „DPAnalyzers“ deutlicher zu erkennen sind. Wie im vorherigen Abschnitt erläutert wurde, kann ein Suchbereich definiert werden, in welchem der „DPAnalyzer“ die Gewichte der Datenfusion dementsprechend auf 0 oder 1 setzt. Der Detektionsbereich (q_{tol}) der Datenfusion in welchen die Gewichte für die Zuflusswahrscheinlichkeiten auf 1 gesetzt werden sollen (siehe Abschnitt 5.3.2.3) ist in diesem Fall zwischen 0,5 und 1.

Kreuzung K020 – östlicher Kreuzungsarm

Wie bereits im Diagramm 11 zu sehen ist, sind die Schätzergebnisse ohne Datenfusion nicht zufriedenstellend. Deshalb wird in diesem Abschnitt das Schätzergebnis mit Datenfusion erzeugt, um das gesamte Potential des „DPAnalyzers“ zu testen. Im Diagramm 18 sind die Ober- und Untergrenzen des Suchbereichs gekennzeichnet. Damit kann ein Eindruck gegeben werden, inwiefern die Datenfusion auf das Schätzergebnis wirkt. Der Verlauf der oberen Grenzkurve ist nachvollziehbar, da in den Verkehrskernzeiten eine Erhöhung der Reisezeiten bzw. Verlustzeiten besteht. Die einzige auffällige Stunde ist 19 Uhr, da es zu einer Erhöhung kommt obwohl um diese Uhrzeit kein großes Verkehrsaufkommen erwartet wird. Der „SQLEstimator“ wird hier nur als Referenz genommen, um die Schätzergebnisse noch einmal zu vergleichen. Das heißt, an dem „SQLEstimator“-Schätzergebnis wurde keine weitere Optimierung vorgenommen.

Das Diagramm 18 stellt die neuen Schätzergebnisse des „DPAnalyzers“ für die Kreuzung K020 mit der Datenfusion dar. Es ist erkennbar, dass die Schätzergebnisse durch die Datenfusion deutlich verbessert wurden. Vor allem sind wesentliche Verbesserungen des Ergebnisses in den Verkehrskernzeiten am Morgen zu erkennen. Am Beispiel der Stunde 7 wurde der Schätzfehler um ca. 40 Meter verringert. An manchen Stellen hat die Datenfusion nur eine kleine Änderung des Schätzergebnisses verursacht. Das liegt daran, dass die Daten sehr eindeutig sind und deshalb kein Optimierungsgrund beim „DPAnalyzer“ besteht. Trotz der extremen Verbesserung der Ergebnisse sind die Schätzfehler noch immer deutlich höher als bei „SQLEstimator“, bei welchem die Schätzergebnisse sehr nah an den realen Rückstaulängen liegen. Die Schätzfehler werden im Abschnitt 5.3.3 ausführlich analysiert.

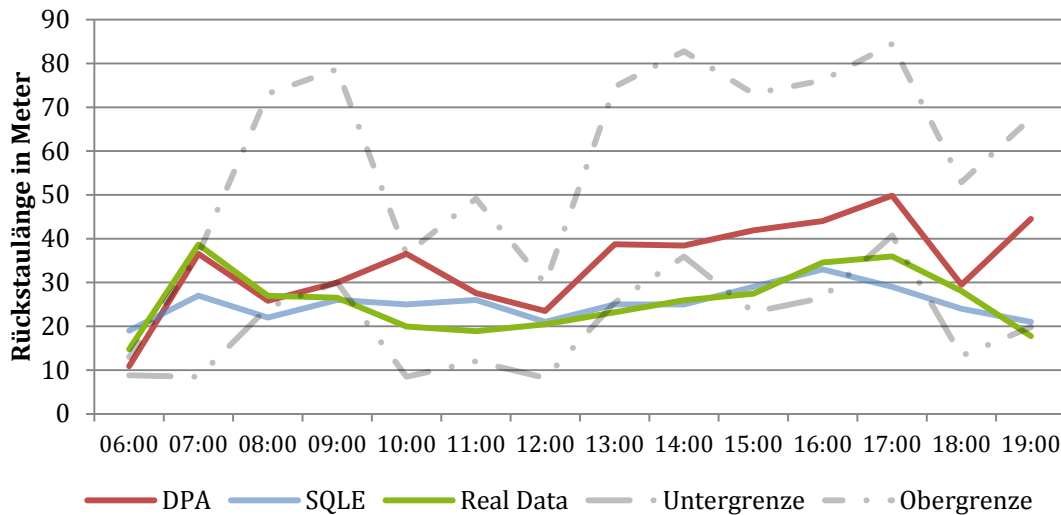


Diagramm 18. Geschätzte Rückstaulängen mit Datenfusion für die Kreuzung K020 – östlicher Kreuzungsarm

Kreuzung K047 – westlicher Kreuzungsarm

Im Vergleich zu den Ergebnissen des „DPAnalyzers“ der Kreuzung K020 sind innerhalb der Schätzergebnisse der Kreuzung K047 ohne Datenfusion zwei große Ausreißer vorhanden. Diese sollten durch den Einsatz der Datenfusion reduziert werden.

Im Diagramm 19 wird das Schätzergebnis mit der Datenfusion verdeutlicht. Wie zu erkennen ist, sind die stündlichen Ergebnisse deutlich besser geworden. Die zwei Ausreißer die im Diagramm 13 verdeutlicht sind, wurden durch die Reduktion des Suchgebiets eliminiert. Weitere Schätzfehler, die oberhalb der realen Rückstaulängen liegen, wurden reduziert und verbessert. Die Schätzfehler, die aber unterhalb der realen Rückstaulängen liegen, wurden durch die Datenfusion nicht beeinflusst. Dies liegt daran, dass die Berechnung der Verlustzeiten, wie im Abschnitt 5.3.2.3 erläutert ist, eine minimale Verlustzeit von 29 Sekunden für diese Streckenabschnittslänge vorgibt. Das bedeutet, dass wenn eine reale Verlustzeit kleiner als die im „DPAnalyzer“ gesetzte ist, wird diese auf 29 Sekunden gesetzt. Deshalb kann im Diagramm 19 eine gerade Linie als Untergrenze bemerkt werden. Die Schätzfehler der Schätzungen mit und ohne Datenfusion werden im nächsten Kapitel analysiert.

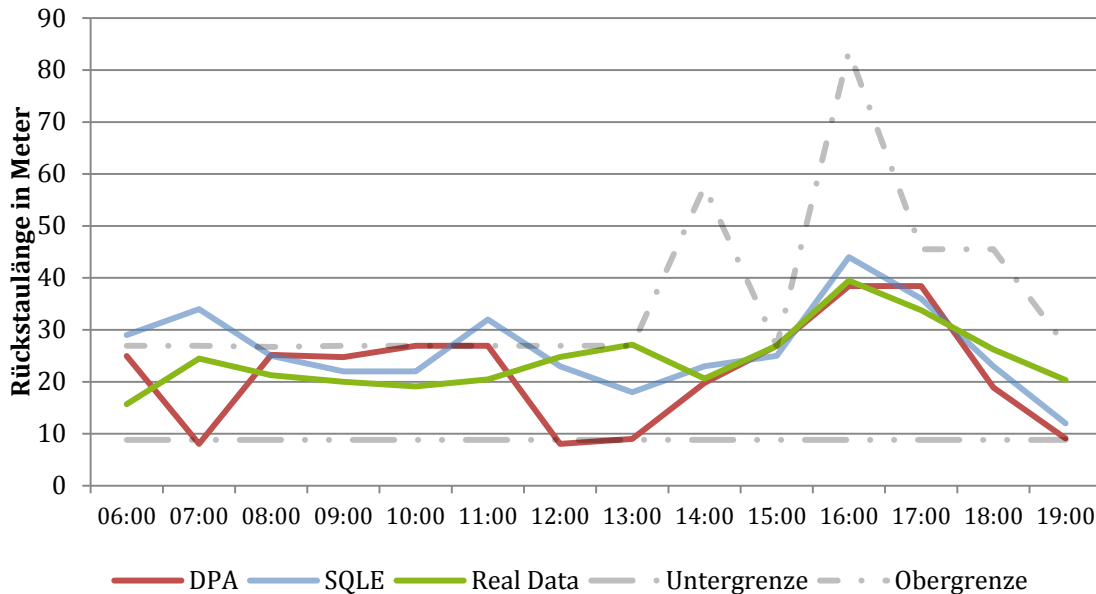


Diagramm 19. Geschätzte Rückstaulängen mit Datenfusion für die Kreuzung K047 – westlicher Kreuzungsarm

5.3.3 Schätzfehleranalyse

Damit ein Überblick über die Schätzfehler bei der Rückstaulängenschätzung mit und ohne Datenfusion geschaffen wird, werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse verglichen. Dabei können Verbesserungen durch den Einsatz der Datenfusion erkannt werden. Es werden die Schätzergebnisse des „DPAnalyzers“ analysiert und die Auswirkung der Datenfusion betrachtet. Da die Schätzergebnisse des „SQLEstimators“ durch die Datenfusion nicht beeinflusst werden, werden diese nur zum Vergleich herangezogen. Die Analyse umfasst die Schätzungen an den beiden Knotenpunkten.

Kreuzung K020 – östlicher Kreuzungsarm

Das Diagramm 20 stellt die „DPAnalyzer“-basierten Schätzfehler mit und ohne Datenfusion für die Kreuzung K020 dar. Im Diagramm wird verdeutlicht, dass der Schätzfehler mit dem Einsatz der Datenfusion im Allgemeinen verringert wurde. Der durchschnittliche Schätzfehler des „DPAnalyzers“ wurde damit von 15,8 auf 9,5 Meter reduziert. Die größte Verbesserung wurde in der Stunde 7 erzielt, in welcher der Schätzfehler von über 35 auf knapp 2 Meter reduziert wurde. An bestimmten Stellen ist der Schätzfehler minimal größer geworden. Das liegt daran, dass die Untergrenze der verlustzeitbasierten Datenfusion an diesen Stellen zu hoch war und deshalb das Schätzergebnis mit der Untergrenze verschoben wurde. Darüber hinaus ist auffallend, dass der hohe Schätzfehler in der Stunde 19 nur partiell durch die Datenfusion beeinflusst wurde. Dies kann an der reduzierten Datenmenge innerhalb dieser Stunde liegen. Im Vergleich weist der „SQLEstimator“ auch nach der Datenfusion im Allgemeinen niedrigere

Schätzfehler auf als der DPAnalyzer. Der Durchschnittsschätzfehler des „SQLEstimators“ liegt bei 3,9 Metern, welcher im Vergleich zu den 9,5 Metern des „DPAnalyzers“ deutlich niedriger ist.

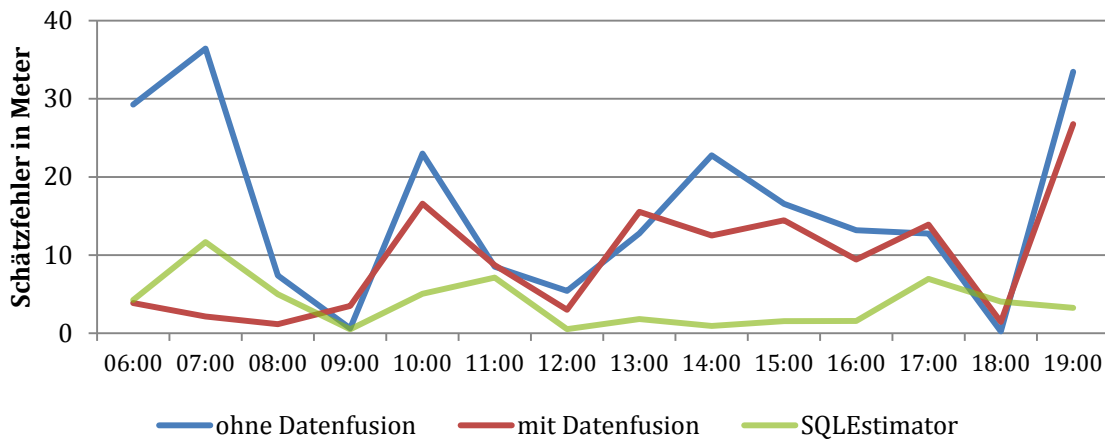


Diagramm 20. Schätzfehleranalyse mit und ohne Datenfusion für die Kreuzung K020 – östlicher Kreuzungsarm

Kreuzung K047 – westlicher Kreuzungsarm

Das Diagramm 21 stellt die „DPAnalyzer“-basierten Schätzfehler mit und ohne Datenfusion für die Kreuzung K047 dar. In dem Diagramm wird verdeutlicht, dass der Schätzfehler, wie bei Kreuzung K020, mit dem Einsatz der Datenfusion im Allgemeinen deutlich verringert wurde. Der durchschnittliche Schätzfehler des „DPAnalyzers“ wurde von 15 auf 7,7 Meter reduziert. Des Weiteren ist aus dem Diagramm erkennbar, dass die Ausreißer in der Schätzung durch die Datenfusion behoben wurden. Die Verbesserung in der Stunde 9 ist mit einer Reduktion des Schätzfehlers von 55 Metern auf 4,7 Meter am auffälligsten. Im Vergleich zur Schätzfehleranalyse der Kreuzung K020 sind bei dieser Analyse keine Vergrößerungen der Schätzfehler durch den Einsatz der Datenfusion erkennbar. Das heißt, dass der Schätzfehler nach der Datenfusion maximal so hoch ist wie der Schätzfehler ohne Datenfusionseinsatz. Dennoch liefert der „SQLEstimator“ trotz Datenfusion niedrigere Schätzfehler. Der Durchschnittsschätzfehler des „SQLEstimators“ liegt mit 5,5 Metern unter dem Wert des „DPAnalyzers“ von 7,7 Metern. Nichtsdestotrotz sind diese Werte für eine Rückstaulängenschätzung vergleichbar mit einer Fahrzeuglänge, so dass beide Verfahren eine ziemlich genaue Schätzung geliefert haben.

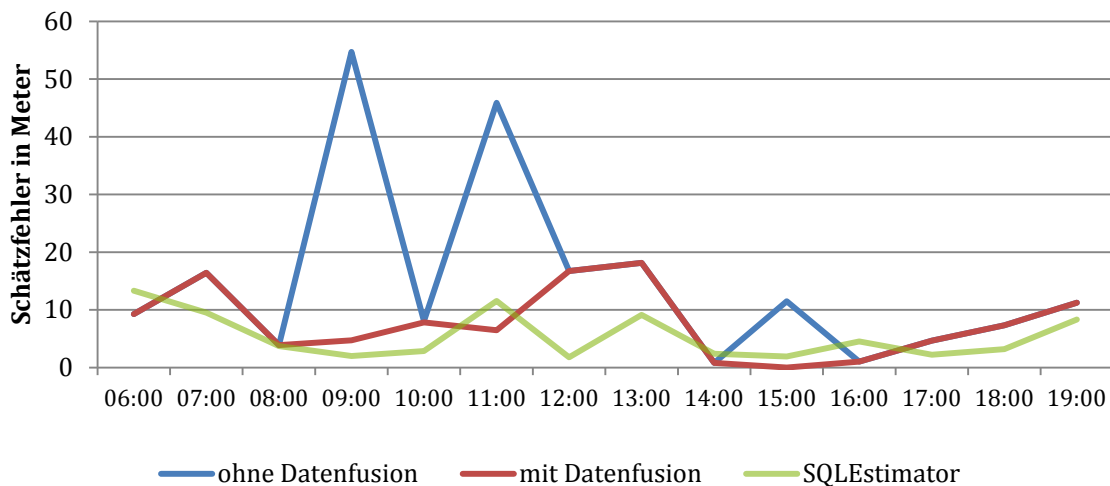


Diagramm 21. Schätzfehleranalyse mit und ohne Datenfusion für die Kreuzung K047 – westlicher Kreuzungsarm

5.3.4 Schlussbetrachtung der Schätzergebnisse

Im Anschluss an die Auswertung der Rückstaulängenschätzung mittels hochfrequenter FCD wird in diesem Abschnitt ein Fazit der vorhandenen Ergebnisse vorgestellt. Dieses soll die Ergebnisse der durchgeführten Schätzungen bewerten. Des Weiteren werden die beiden Rückstaulängenschätzer näher betrachtet, um jeweils das Potential zu analysieren. Anschließend werden die Ursachen von Abweichungen sowie Nachteile und Vorteile der beiden Rückstaulängenschätzer basierend auf hochfrequenten FCD veranschaulicht.

Wenn die Ergebnisse im Allgemeinen betrachtet werden, wird deutlich, dass der „DPAnalyzer“ mit den hochfrequenten FCD ohne Datenfusion kein gutes Ergebnis liefert. Auffällig sind die Ausreißer bei der Schätzung, die stellenweise ein Mehrfaches der realen Rückstaulängen betragen. Im Gegensatz zu den schlechten Schätzungen des „DPAnalyzers“ weist das einfache Verfahren zur Rückstaulängenschätzung „SQLEstimator“ sehr gute Schätzungen auf.

Zur Verbesserung der Ergebnisse des „DPAnalyzers“ wurde anschließend eine verlustzeitbasierte Datenfusion (siehe Abschnitt 5.3.2) eingesetzt. Mittels Datenfusion wurde der Suchbereich des „DPAnalyzers“ basierend auf Verlustzeiten auf sehr grob zu erwartenden Bereich begrenzt. Die Schätzergebnisse wurden nach dem Einsatz der Datenfusion deutlich verbessert. Dennoch wird klar, dass die Ergebnisse des „SQLEstimators“ auch nach der Datenfusion besser sind. Diese Erkenntnis führt zum Rückschluss, dass bei der Verfügbarkeit von hochfrequenten FCD ein einfaches Verfahren für die Bestimmung der Rückstaulängen ausreichend ist.

Das vorgestellte einfache Verfahren zur Rückstaulängenschätzung weist ein hohes Potential beim Einsatz von hochfrequenten FCD auf. Dieses Verfahren ist einfach verständlich und einsetzbar. Dennoch besitzt das Verfahren Nachteile. Das Verfahren wurde für die Rückstaulängenschätzung mit hochfrequenten FCD entwickelt, jedoch werden hochfrequente FCD zurzeit aus ökonomischen Gründen noch nicht häufig erfasst. Weiterhin ist das Verfahren nur auf die Rückstaulängen beschränkt. Das heißt, dass keine Erweiterungen oder Schnittstellen während der Entwicklung eingeplant wurden.

Der „DPAnalyzer“ weist im Gegensatz zum „SQLEstimator“ ein niedrigeres Potential in der Rückstaulängenschätzung mittels hochfrequenter FCD auf. Das Verfahren wurde nicht für die Rückstaulängenschätzung mit dieser Art von FCD entwickelt. Der Einsatz von Datenfusion hat gute Ergebnisse gebracht, jedoch werden dabei weitere Daten benötigt und es ist ein größerer Aufwand für die Schätzung erforderlich. Ein Vorteil des Verfahrens ist die Flexibilität, die den Einsatz von Zusatzwissen ermöglicht, um die Schätzergebnisse zu verbessern oder weitere Kenngrößen zu bestimmen. Ursachen für die großen Abweichungen der Ergebnisse des „DPAnalyzers“ kann die Art (hochfrequent) oder die Anzahl der FCD-Meldungen sein oder aber das Schätzverfahren selbst. Um einen besseren Einblick in die Ursachen des Schätzfehlers und das Rückstaulängenschätzpotential zu bekommen, wird im nächsten Abschnitt das Verfahren mit Taxi-FCD getestet.

5.4 Potentialanalyse von Taxi-FCD in der Rückstaulängenschätzung

Der „DPAnalyzer“ wurde grundsätzlich für die Rückstaulängenschätzung mittels Taxi-FCD geplant. Diese haben im Vergleich zu den hochfrequenten FCD ein längeres Meldeintervall. Als hochfrequent wird ein Intervall von 1 – 5 Sekunden bezeichnet. Die Taxi-FCD melden ihre Position in den meisten Fällen in einem Intervall von >30 Sekunden. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt die Leistung des „DPAnalyzers“ mit Taxi-FCD geprüft. Die Ergebnisse werden mit den realen durchschnittlichen Rückstaulängen, die während der Messkampagne erhoben wurden, verglichen. Darüber hinaus wurden nur Taxi-FCD Meldungen betrachtet, die an Dienstagen und Donnerstagen erfasst wurden, da diese zwei Wochentage üblicherweise einen ähnlichen Tagesverlauf der Verkehrsnachfrage aufweisen. Es wurden Taxi-FCD der letzten vier Monaten für die Auswertung benutzt, Ferienzeiten jedoch herausgefiltert. Für die Auswertung wurde das gleiche Programm wie bei der Auswertung mit hochfrequenten FCD eingesetzt (siehe Abschnitt 5.2). Der „SQLEstimator“ wurde im Rahmen dieser Auswertung nicht getestet, weil es ein Verfahren ist, das für die Auswertung mit hochfrequenten FCD entwickelt wurde.

Der „DPAnalyzer“ wird, wie bei der Analyse mit hochfrequenten FCD, ohne und mit Datenfusion getestet. Darüber hinaus werden die gleichen zwei Kreuzungsarme der betrachteten Knotenpunkte wie bei der zuvor erwähnten Analyse untersucht. Des Weiteren werden bei der Datenfusion Reisezeiten bzw. Verlustzeiten, die aus den Messkampagnendaten und den Taxi-FCD berechnet wurden, eingesetzt. Somit kann eine Datenfusion aus unterschiedlichen Quellen erreicht werden. Die Verlustzeiten werden im Rahmen dieser Auswertung gemäß Abschnitt 5.3.2 berechnet. Die Auswertung soll zeigen, ob mit diesem Verfahren Schätzergebnisse ermittelt werden können, die einen ähnlichen Kurvenverlauf wie die realen Rückstaulängen aufweisen.

5.4.1 Schätzergebnisse ohne Datenfusion

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den Rückstaulängenschätzungsergebnissen des „DPAnalyzers“ mittels Taxi-FCD ohne Integration der Datenfusion.

K020 – östlicher Kreuzungsarm

Das Diagramm 22 veranschaulicht die Schätzergebnisse für die Kreuzung K020. Die Ergebnisse verdeutlichen die enormen Abweichungen von den realen Rückstaulängen, die während der Messkampagne erhoben wurden. Des Weiteren zeigen die Schätzungen mehrere große Ausreißer, die den normalen Tagesgangverlauf zerstören. Darüber hinaus ist anzumerken, dass beim Knotenpunkt K020 innerhalb des betrachteten Zeitraums von vier Monaten eine recht geringe Anzahl an Taxi-FCD vorliegt. Im Abschnitt 5.4.4 werden weitere mögliche Ursachen solcher abweichenden Schätzergebnissen untersucht.

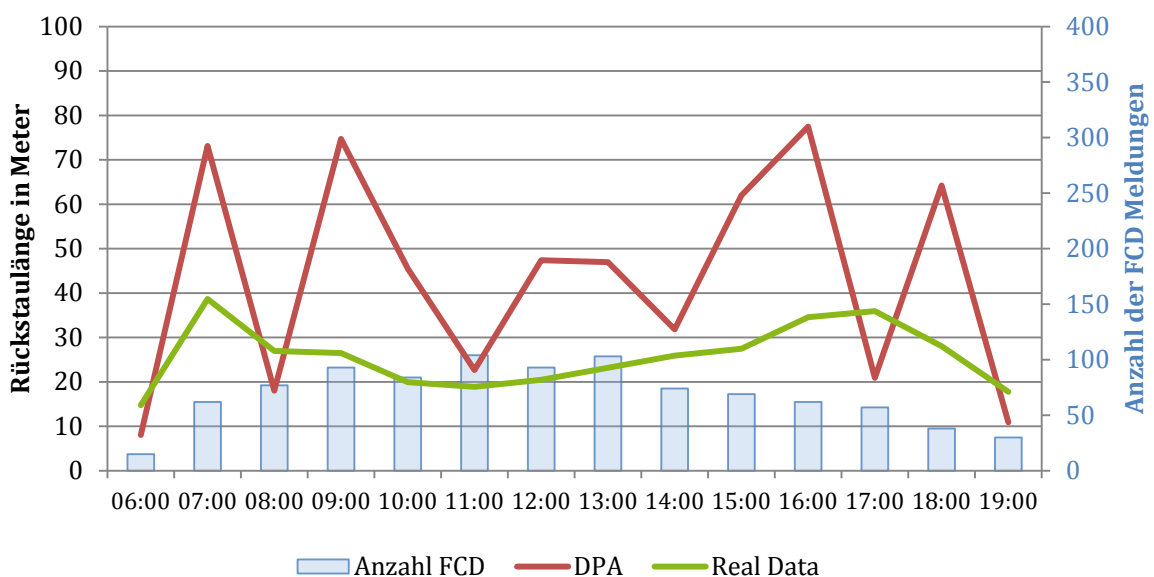


Diagramm 22. Geschätzte Rückstaulängen für die Kreuzung K020 – östlicher Kreuzungsarm mittels TaxiFCD

K047 – westlicher Kreuzungsarm

Im Diagramm 23 werden die Rückstaulängenschätzungen für den westlichen Kreuzungsarm des K047 dargestellt. Das Diagramm weist Abweichungen von den realen Rückstaulängen auf. In diesem Zusammenhang können zwei Ausreißer herausgehoben werden (11 und 13 Uhr). Im Falle der Vernachlässigung dieser Ausreißer würden die Schätzergebnisse einen normalen Tagesverlauf aufweisen. Im Vergleich zu den Schätzungen für die Kreuzung K020 zeigt K047 ein höheres Potential, durch das Verfahren mit zusätzlicher Datenfusion positiv beeinflusst zu werden.

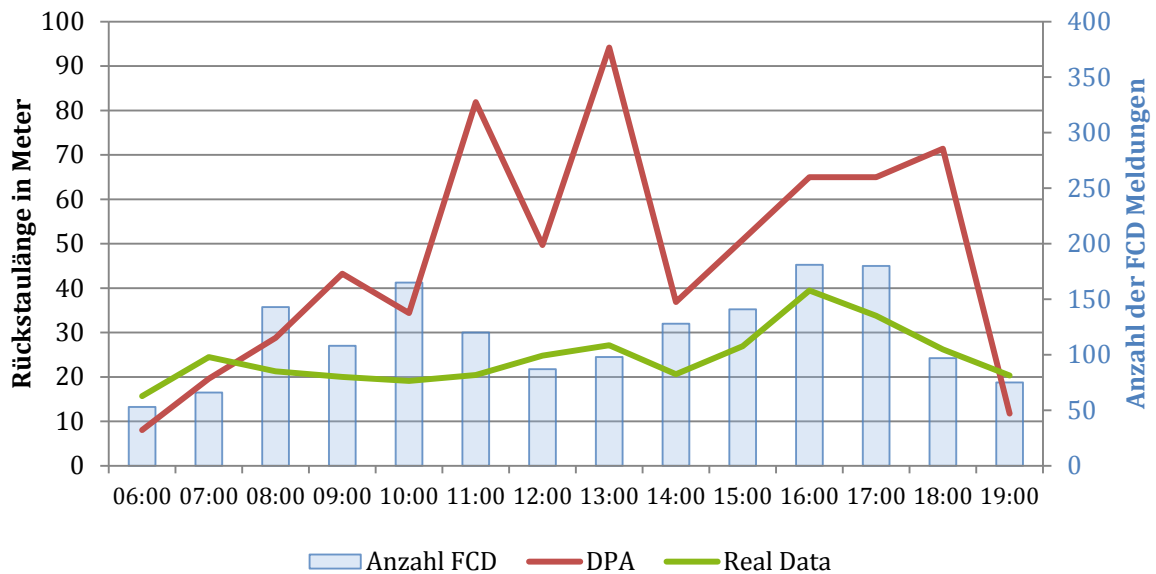


Diagramm 23. Geschätzte Rückstaulängen für die Kreuzung K047 – westlicher Kreuzungsarm mittels Taxi-FCD

5.4.2 Schätzergebnisse mit Datenfusion

In diesem Abschnitt werden die Schätzergebnisse vorgestellt, die mittels Datenfusion erzielt wurden. Dabei wird erwartet, dass der Schätzfehler deutlich niedriger ist als bei der im letzten Abschnitt vorgestellten Auswertung ohne Datenfusion. Die Datenfusion wird mit Hilfe von Verlustzeiten verwirklicht, die aus den Taxi-FCD und den Messkampagnendaten stammen.

K020 – östlicher Kreuzungsarm

Im Diagramm 24 ist das Schätzergebnis des „DPAnalyzers“, das mittels Taxi-FCD und verlustzeitbasierter Datenfusion erzielt wurde, graphisch dargestellt. Dieses zeigt, dass die Ergebnisse durch den Einsatz der Datenfusion deutlich beeinflusst wurden. Es kann behauptet werden, dass die Schätzergebnisse besser geworden sind, jedoch weisen diese keinen normalen Tagesgang auf. Der Begriff „normaler Tagesgang“ bezeichnet den Verlauf eines Tagesgangs, der in Hauptverkehrszeiten am Morgen und am Nachmittag

durch Spitzen abgebildet wird. In diesem Beispiel wurde das Ergebnis durch die Datenfusionsobergrenze abgeschnitten. Das Problem liegt in dem linearen Verlauf der Unter- und Obergrenze der Datenfusion. Darüber hinaus sind die Verlustzeiten, die mit dem Taxi-FCD berechnet wurden, sehr niedrig, was dazu führt, dass bei der Berechnung der Verlustzeiten im „DPAnalyzer“ immer die niedrigste Verlustzeit übernommen wird (vgl. Abschnitt 5.3.2.3). Das heißt, dass der „DPAnalyzer“ immer im selben Bereich die durchschnittliche Rückstaulänge sucht.

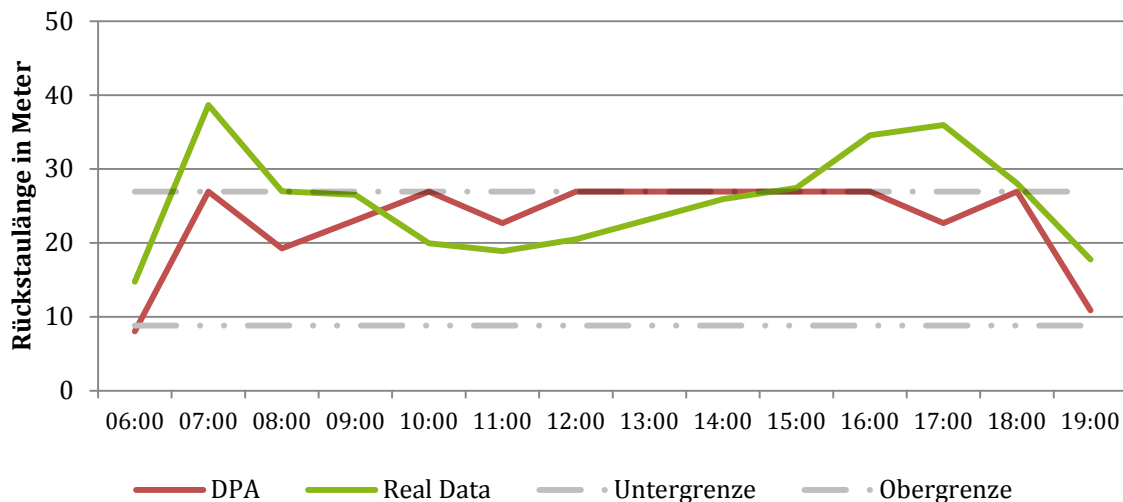


Diagramm 24. Geschätzte Rückstaulängen mit Datenfusion(Verlustzeiten Taxi-FCD) für die Kreuzung K020 – östlicher Kreuzungsarm mittels Taxi-FCD

Das Diagramm 25 verdeutlicht das Schätzergebnis des „DPAnalyzers“, das mittels Datenfusion basierend auf den Verlustzeiten der Messkampagnendaten erzielt wurde. In diesem Diagramm ist auch der Einfluss der Datenfusion deutlich erkennbar. Das Ergebnis wurde zwar verbessert, jedoch sind die Ausreißer an einigen Stellen möglicherweise nicht zu verhindern. Die meisten Schätzergebnisse liegen an der Unter- bzw. Obergrenze des Suchbereichs. Wie schon mehrmals in der Arbeit erwähnt sind die Unter- und Obergrenze die Grenzen des Suchbereichs das durch die Datenfusion erzeugt wurde. Dieser Zusammenhang kann auf die Berechnung der Verlustzeiten innerhalb der Datenfusion zurückgeführt werden. Dies deutet darauf hin, dass die verlustzeitbasierte Datenfusion beim „DPAnalyzer“ nicht immer gute Ergebnisse verspricht. Allgemein betrachtet sind die Ergebnisse mit Datenfusion für die Kreuzung K020 nicht zufriedenstellend. Die Schätzfehleranalyse wird im Abschnitt 5.4.3 veranschaulicht.

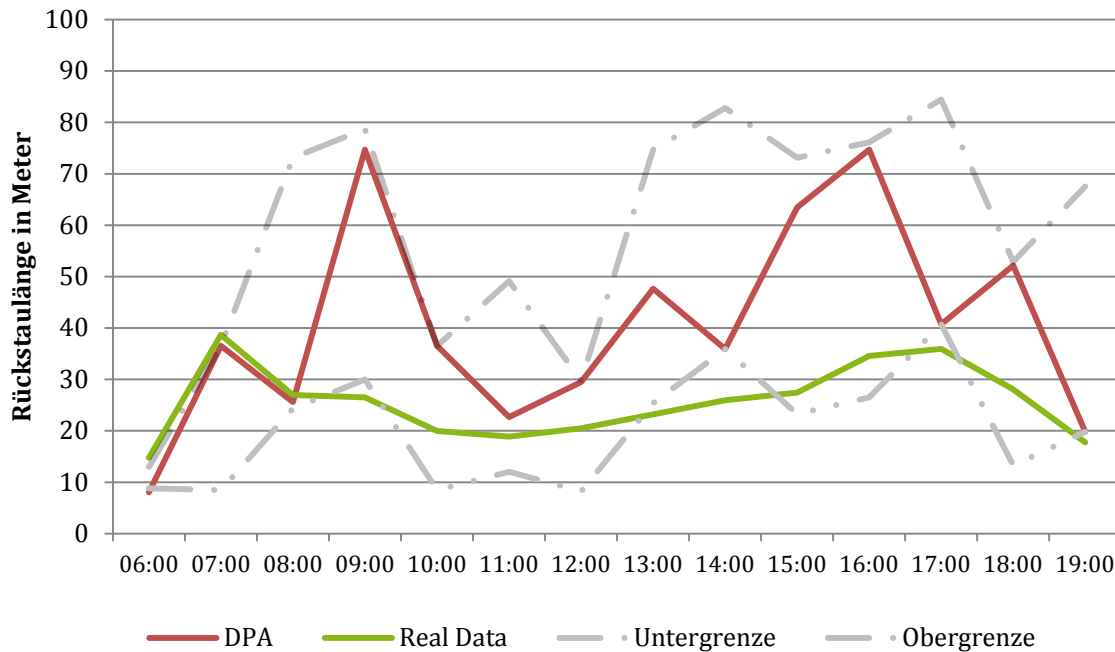


Diagramm 25. Geschätzte Rückstaulängen mit Datenfusion(Verlustzeiten Messkampagne) für die Kreuzung K020 – östlicher Kreuzungsarm mittels TaxiFCD

K047 – westlicher Kreuzungsarm

Das Diagramm 26 verdeutlicht für die Kreuzung K047 das Schätzergebnis des „DPAnalyzers“, das mittels Taxi-FCD verlustzeitbasierter Datenfusion erzielt wurde. Das Schätzergebnis weist keinen normalen Tagesgangverlauf auf, da es von der Datenfusion komplett beeinflusst wurde. Die Ausreißer wurden durch die Datenfusion eliminiert, jedoch mit der Konsequenz, dass keine richtige Schätzung stattgefunden hat.

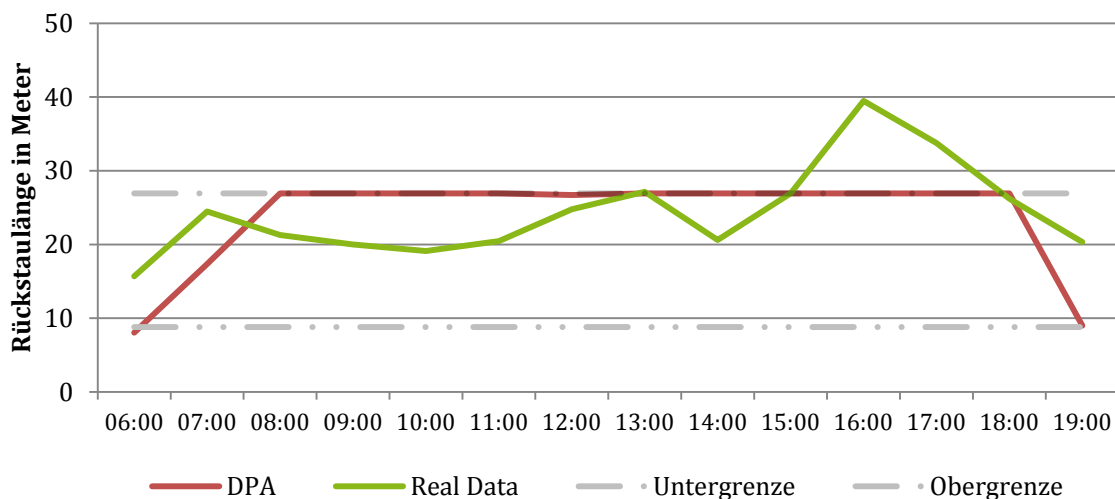


Diagramm 26. Geschätzte Rückstaulängen mit Datenfusion(Verlustzeiten Taxi-FCD) für die Kreuzung K047 – westlicher Kreuzungsarm mittels Taxi-FCD

Im Diagramm 27 werden die geschätzten Rückstaulängen des „DPAnalyzers“ mit verlustzeitbasierter Datenfusion, die mittels Messkampagnendaten erzeugt wurde, veranschaulicht. Die Datenfusion weist deutliche Verbesserungen der Schätzergebnisse im Vergleich zu den Ergebnissen ohne Datenfusion (vgl. Diagramm 23) auf. Durch die Obergrenze der Datenfusion wurden die zwei wesentlichen Ausreißer eliminiert, jedoch existieren in den Nachmittagsverkehrsspitzenzeiten weiterhin Abweichungen von den realen Rückstaulängen. Im nächsten Abschnitt werden die Verbesserungen durch die Datenfusion analysiert.

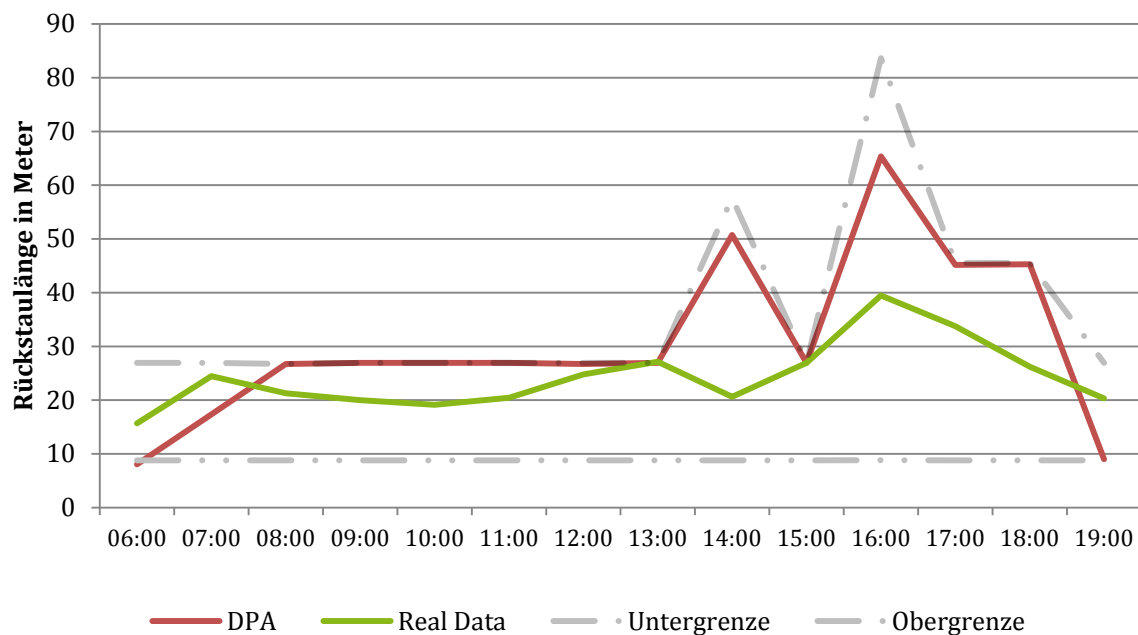


Diagramm 27. Geschätzte Rückstaulängen mit Datenfusion (Verlustzeiten Messkampagne) für die Kreuzung K047 – westlicher Kreuzungsarm mittels Taxi-FCD

5.4.3 Schätzfehleranalyse

Die Schätzfehleranalyse wird zwecks eines besseren Überblicks über die Auswirkung der Datenfusionsintegration in der Schätzung durchgeführt. Da der „SQLEstimator“ in der Schätzung mit Taxi-FCD nicht verwendet wurde, werden diese Schätzergebnisse innerhalb der folgenden Analyse vernachlässigt.

K020 - östlicher Kreuzungsarm

Das Diagramm 28 verdeutlicht die Auswirkung der verlustzeitbasierten Datenfusion. Die Ergebnisse ohne Datenfusion wichen in diesem Fall stark von den realen Rückstaulängen ab. Im Durchschnitt lag der Schätzfehler bei 22,8 Metern. Die Datenfusion mittels Messkampagnendaten hat die Schätzung nur minimal auf 16,4 Meter verbessert. Im Gegensatz zur messkampagnendatenbasierten Datenfusion zeigt die Taxi-FCD-basierte klare Schätzverbesserungen. Der durchschnittliche Schätzfehler wurde auf 5,8 Metern

reduziert. Damit ergibt sich in etwa eine vierfache Verbesserung des Ergebnisses. Dennoch weist die Schätzung im Diagramm 24 keinen normalen Tagesgang auf und ist von der Datenfusion komplett beeinflusst. Die Ursache dafür ist im Abschnitt 5.4.2 erklärt.

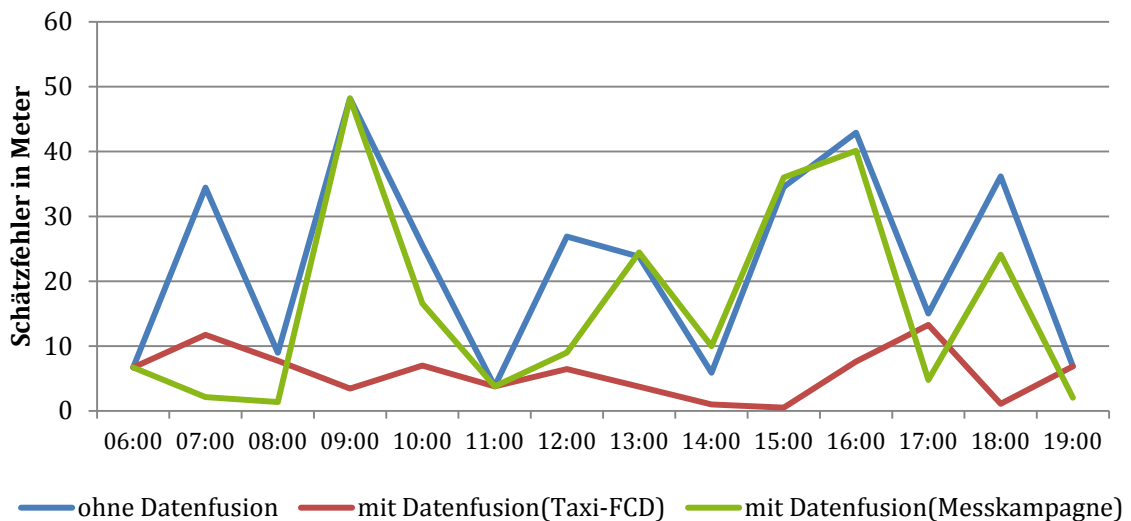


Diagramm 28. Schätzfehleranalyse mit und ohne Datenfusion für die Kreuzung K020 – östlicher Kreuzungsarm K020 – östlicher Kreuzungsarm (Taxi-FCD)

K047 – westlicher Kreuzungsarm

Im Diagramm 29 werden die Schätzfehler für die Kreuzung K047 mit und ohne Datenfusion dargestellt. Das Diagramm zeigt die hohen Schätzfehler, die bei der Schätzung ohne Datenfusion erzielt wurden. Besonders auffallend sind die beiden Ausreißer in der Schätzung der Stunden 11, 13 und 18. Der durchschnittliche Fehler in der Rückstaulängenschätzung ohne Datenfusion liegt bei 25,9 Metern. Darüber hinaus zeigt die Datenfusion mit dem Taxi-FCD-basierten Verlustzeiten eine deutliche Minderung des Schätzfehlers, wodurch der durchschnittliche Schätzfehler auf 10,1 Meter reduziert wurde. Des Weiteren zeigen die Schätzergebnisse der Messkampagnendaten der verlustzeitbasierten Datenfusion eine noch genauere Schätzung, wobei der durchschnittliche Rückstauschätzfehler bei 5,8 Meter liegt. In diesem Fall ist die Rückstaulängenschätzung jedoch stark von der Datenfusion beeinflusst.

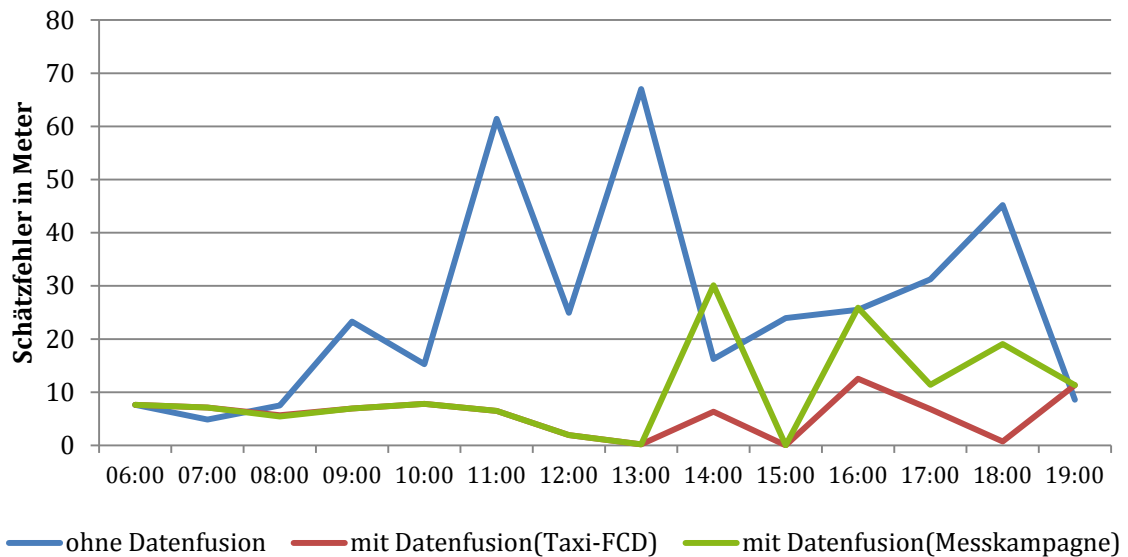


Diagramm 29. Schätzfehleranalyse mit und ohne Datenfusion für die Kreuzung K020 – östlicher Kreuzungsarm K047 – westlicher Kreuzungsarm (Taxi-FCD)

5.4.4 Schlussbetrachtung der Schätzergebnisse

Die Schätzergebnisse zeigen, dass Optimierungsbedarf bei der Rückstaulängenschätzung mittels des „DPAnalyzers“ basierend auf Taxi-FCD besteht. Die Schätzungen ohne Datenfusion weisen eine große Divergenz zu den realen Rückstaulängen auf. Diese waren bei der Kreuzung K020 deutlicher zu erkennen als bei K047, was auf die geringe Datenmenge der letzten vier Monate zurückgeführt werden kann. Die Rückstaulängenschätzung mittels Taxi-FCD hat bei der Kreuzung K047 zwar genauere Rückstaulängen geliefert, dennoch waren trotz der hohen Anzahl an FCD-Meldungen Ausreißer bei der Schätzung zu erkennen. Diese können in der Ermittlung der durchschnittlichen Rückstaulängen während der Maximum-Likelihood-Schätzung auftreten, da sich diese bei geringerer Datenmenge an den extremeren Rückstaulängen orientiert. Um diesen Verdacht überprüfen zu können, sind im Diagramm 30 die Schätzergebnisse mit der ergänzten FCD-Anzahl dargestellt. Die rechte vertikale Achse wurde um die Anzahl der FCD-Meldungen für die Tage Montag und Mittwoch erhöht. Die rote Kurve bezeichnet die neuen und die blaue die bestehenden FCD-Meldungen, die an Dienstagen und Donnerstagen erfasst wurden.

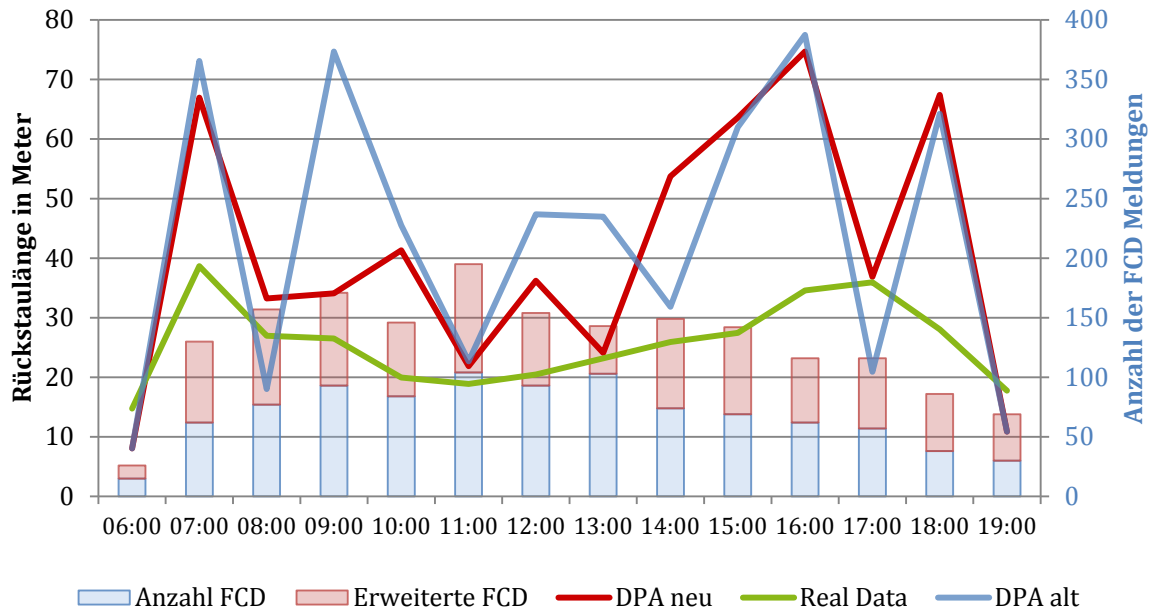


Diagramm 30. Ergänzung der FCD- Anzahl für die Kreuzung K020 - östlicher Kreuzungsarm mit Taxi-FCD

Im Diagramm 30 wird verdeutlicht, dass die Schätzungen nur teilweise von der Erhöhung der FCD-Meldungen beeinflusst wurden. Des Weiteren wurde der geschätzte Tagesgangverlauf verbessert. Es wurden schließlich die Ausreißer verringert und damit die Verkehrskernzeiten deutlicher dargestellt. Der durchschnittliche Fehler wurde von den ursprünglichen 22,8 Metern auf 17,2 Meter reduziert. Diese Erkenntnis unterstützt den Verdacht, dass der Schätzfehler nur teilweise an der Anzahl der Daten liegt.

Aufgrund der schlechten Schätzergebnisse wurde im Abschnitt 5.4.2 anschließend die verlustzeitbasierte Datenfusion eingesetzt. Im Rahmen dieser Auswertung wurden zwei Verlustzeiten berechnet, eine aus den Taxi-FCD und eine aus den hochfrequenten FCD der Messkampagne. Diese sollen dazu dienen, einen Vergleich der Datenfusionsergebnissen zu ermöglichen und die Frage zu beantworten, welche Verlustzeiten durch die Datenfusion bessere Schätzergebnisse liefern. Es hat sich gezeigt, dass bei den Taxi-FCD-basierten Verlustzeiten das Schätzergebnis deutlich verbessert wurde. Dennoch wurde das Ergebnis stark von der Datenfusion beeinflusst, wobei die Datenfusionsobergrenze den geschätzten Tagesgang bestimmt hat. Das bedeutet, dass eine richtige Schätzung der Rückstaulängen nicht stattgefunden hat. Des Weiteren hat die Datenfusion mit hochfrequenten FCD-basierten Verlustzeiten nicht alle Ausreißer für die Kreuzung K020 eliminieren können. Dies war zu erwarten, da die geschätzten Rückstaulängen ohne Datenfusion in den meisten Fällen sehr von den realen Rückstaulängen abwichen.

Abschließend kann festgestellt werden, dass der Schätzfehler durch die Datenfusion verringert wurde, jedoch wurden keine zufriedenstellenden Schätzungen geliefert. Der Schätzfehler ist ohne Datenfusion eindeutig zu hoch und sollte durch die Optimierung des Verfahrens verringert werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel umfasst die im Rahmen dieser Arbeit erbrachte theoretische und praktische Leistung. Darüber hinaus werden die erzielten Ergebnisse zusammengefasst. Optimierungsvorschläge werden für die Rückstaulängenschätzung mittels hochfrequenter und Taxi-FCD vorgestellt. Anschließend wird der Zukunftsausblick der Rückstaulängenschätzung mittels FCD in Betrachtung genommen.

Zum Beginn der Arbeit wurden die Motivation und herkömmliche Verfahren zur Rückstaulängenschätzung erläutert. Darüber hinaus wurde die Idee, Funktionsweise und Testergebnisse des Verfahrens zur Rückstaulängenschätzung mittels FCD „DPAnalyzer“ vorgestellt. Des Weiteren wurden die Grundlagen der Gewinnung von FCD erklärt. In diesem Zusammenhang wurde das Beispiel der Erfassung von Taxi-FCD am Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR vorgestellt. Der theoretische Teil der Arbeit endet mit der grundlegenden Beschreibung der Erfassung von xFCD und herkömmlichen Ansätzen der mobilen Datenerfassung. Der theoretische Teil diente der Einführung in das Thema Rückstaulängenschätzung vor Lichtsignalanlagen mittels FCD.

Der praktische Teil der Arbeit beginnt mit der Messkampagnenbeschreibung und deren Erwartungen. Des Weiteren wird die Entwicklung einer Webservice-Schnittstelle zur Erhebung von hochfrequenten FCD, xFCD und weiteren Fahrzeugdaten vorgestellt. Diese Schnittstelle konnte im Rahmen der Messkampagne aus technischen Gründen leider noch nicht verwendet, jedoch stellt diese einen Grundstein für die zukünftige drahtlose Echtzeit-Fahrzeugs- und Positionsdatenerfassung dar. Darüber hinaus sind die Planung und Umsetzung und anschließend die Messkampagnendatenauswertung ausführlich beschrieben. In diesem Kontext werden auch die eingesetzte alternative Plattform zur Erfassung von hochfrequenten FCD und weitere erfasste Daten beschrieben. Im Anschluss zum ersten Teil der praktischen Umsetzung wurde der „SQLEstimator“, das einfache Verfahren zur Rückstaulängenschätzung mittels hochfrequenter FCD, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, vorgestellt. Ferner wurde die Entwicklung eines Java basierten Programms, welches der schnellen Schätzanalyse dient, beschrieben. Weiterhin wurden die Ergebnisse der Schätzungen der beiden Rückstaulängenschätzer mit hochfrequenten FCD vorgestellt. Um das Schätzergebnis des „DPAnalyzers“ zu verbessern, wurde die Datenfusionsschnittstelle in Bezug genommen. Anschließend wurde der „DPAnalyzer“ mit TaxiFCD validiert. Alle Schätzungen des „DPAnalyzers“ wurden in einer Schätzfehleranalyse verglichen, um das Potential der Datenfusionsschnittstelle zu testen. Die Ergebnisse der Rückstaulängenschätzung mittels hochfrequenter FCD der beiden Verfahren wurden verglichen und analysiert. Im nächsten

Abschnitt wurde eine Zusammenfassung der durchgeführten Rückstaulängenschätzungen vorgestellt.

Die Schätzergebnisse der Rückstaulängenschätzung mittels hochfrequenter FCD haben gezeigt, dass ein einfaches Verfahren (SQLEstimator), das für die Schätzung mittels hochfrequenter FCD entwickelt wurde, sehr gute Ergebnisse in diesem Zusammenhang liefern kann. Mit anderen Worten liefert der „SQLEstimator“ Schätzergebnisse, die einen guten Zusammenhang mit den realen Rückstaulängen aufweisen. Darüber hinaus lieferte das Verfahren, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, einen Tagesgangverlauf, der sehr ähnlich zum realen Tagesgang ist.

Im Gegensatz zum „SQLEstimator“ wurde der „DPAnalyzer“ nicht für die Rückstaulängenschätzung mittels hochfrequenter FCD entwickelt. Bei der Entwicklung wurde der Taxi-FCD Ansatz betrachtet, welches FCD-Meldungen im Intervall von >30 Sekunden liefert. Die Schätzergebnisse haben gezeigt, dass der „DPAnalyzer“ ohne Datenfusion große Abweichungen, meistens an den Stellen, an welchen weniger FCD vorhanden sind, aufweist. Die Datenfusion hat beim „DPAnalyzer“ die Aufgabe, solche Ausreißer zu eliminieren. Deshalb wurden die Ergebnisse durch eine verlustzeitbasierte Datenfusion deutlich verbessert. Dennoch war die Schätzleistung des „DPAnalyzers“ im Vergleich zum „SQLEstimator“ niedriger.

Da der „DPAnalyzer“ für die Rückstaulängenschätzung mittels Taxi-FCD entwickelt wurde, wurde das Verfahren anschließend mit den vorhandenen Taxi-FCD validiert. Im Vergleich zu den realen Rückstaulängen waren die Schätzergebnisse ohne Datenfusion deutlich höher. Die Datenfusion erfolgte mit den messkampagnendaten-basierten und den durch Auswertung der Taxi-FCD verfügbaren Verlustzeiten. Der Schätzfehler wurde mittels Datenfusion sichtlich reduziert, jedoch wiesen die Ergebnisse keinen sinnvollen Tagesgangverlauf auf.

Die Idee, eine genaue Rückstaulängenschätzung mittels schon vorhandener Taxi-FCD zu verwirklichen, war interessant, jedoch haben die realen Rückstaulängen aus dem Messkampagnendaten gezeigt, dass die reale Abwicklung des Verkehrs vor einer LSA sehr viel komplexer ist als im Rahmen des „DPAnalyzers“ angenommen. Aufgrund dessen ist im Allgemeinen eine 100% genaue und kostengünstige Rückstaulängenschätzung momentan sehr schwer zu verwirklichen. Für die Rückstaulängenschätzung mit hochfrequenten FCD wird aufgrund der einfacheren und genaueren Daten kein komplexes Verfahren benötigt. Ein Verfahren wie der „SQLEstimator“ wird wegen der Genauigkeit und Überschaubarkeit bevorzugt. Andererseits hat das Verfahren den Nachteil, dass aufgrund der Kosten momentan keine

hochfrequenten FCD erfasst werden. Die Rückstaulängenschätzung mittels Taxi-FCD hat gezeigt, dass der „DPAnalyzer“ optimierungsbedürftig ist. Der Optimierungsbedarf besteht in der Ermittlung der durchschnittlichen Rückstaulängen. Die integrierte Maximum-Likelihood-Schätzung scheint, bei einer geringeren Datenmenge, die durchschnittlichen Rückstaulängen in den Extremen zu suchen. Obwohl der „DPAnalyzer“ in Simulationstests gute Ergebnisse geliefert hat, ist in der Realität mit, wie schon in diesem Abschnitt erwähnt, ständigen Änderungen der Verkehrslage zu rechnen. Darüber hinaus zeigte die Datenfusionsschnittstelle ein hohes Potential, da die Schätzergebnisse erkennbar besser geworden sind.

Für die zukünftigen Messkampagnen zur Erhebung von hochfrequenten FCD wird eine höhere Anzahl von Messfahrzeugen (2-4) empfohlen, da während dieser Messkampagne mit einem Messfahrzeug maximal 13 Durchläufe während einer Messstunde durchgeführt werden konnten. Weiterhin wird eine ganzwöchige oder mehrwöchige Erhebung der realen Verkehrslage vor einer LSA empfohlen, da somit ein Überblick über die reale Verkehrslage über einen längeren Zeitraum geschaffen wird.

In der Zukunft werden die Taxi-FCD höchstwahrscheinlich in kürzeren Intervallen (<5 Sekunden) geliefert. Das würde bedeuten, dass eine größere Menge hochfrequenter FCD zur Verfügung stehen würde. Hiermit könnten einfache Verfahren wie der „SQLEstimator“ eingesetzt werden, um für bestimmte Zeiträume die Rückstaulängen zu ermitteln. Eine Kopplung dieser Positionsdaten und mit Daten aus C2I-Kommunikation würde die Rückstaulängenschätzung sicherlich deutlich verbessern und vereinfachen. Darüber hinaus würde eine Erhöhung des Anteils an C2I-fähigen Fahrzeugen, was in der Zukunft zu erwarten ist, eine höhere Anzahl von verfügbaren Verkehrsdaten bedeuten. Hiermit könnten eine Reihe von Verkehrskenngrößen ermittelt und für die Verbesserung der Qualität und Sicherheit des Verkehrs eingesetzt werden.

Literatur

- Veröffentlichungen

[1] ACATECH; *Mobilität 2020. Perspektiven für den Verkehr von morgen*; Fraunhofer IRB Verlag, 2006 in Stuttgart

[2] BREITENBERGER, S., GRÜBER, B., Neuherz, M.; *XFCD – Extended Floating Car Data - Potenziale für die Verkehrsinformation und Durchdringungsraten*; Straßenverkehrstechnik, BMW Group 10:522–531, 2004 in München

[3] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; *Jahreswirtschaftsbericht 2011 – Zusammenfassung*; 2011 in Berlin

[4] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; *Mobilität und Verkehrstechnologien*; Das 3. Verkehrsforschungsprogramm der Bundesregierung; 2008 in Berlin

[5] BOLTZE, M. WOLFERMANN, A. SCHÄFER, P.: *Leitfaden Verkehrstelematik, Hinweise zur Planung und Nutzung in Kommunen und Kreisen*; Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen; Technische Universität Darmstadt; 2005 in Darmstadt

[6] BROCKFELD, E., PASSFELD, B., WAGNER, P.; *Validating Travel Times Calculated on the Basis of Taxi Floating Car Data with Test Drives (Validierung der Reisezeiten berechneten basierend auf Taxi Floating Car Daten mit Testfahrten)*; In: ITS2007 - 14th World Conference on Intelligent Transport Systems - Proceedings on CD-ROM (Paper-ID 4134). ITS2007 - 14th World Congress on ITS, 2007-10-09 - 2007-10-13, Beijing Exhibition Center, Beijing, China

[7] COMERT, G., CETIN, M.; *Queue length estimation from probe vehicle location and the impacts of sample size (Rückstaulängenschätzung mittels Messfahrzeugposition und die Auswirkung der Stichprobeumfang)*; European Journal of Operational Research, doi:10.1016/j.ejor.2008.06.024; 2008 in Columbia, USA

[8] HUBER, W., LÄDKE, M., OGGER, R.; *Extended floating car data for the acquisition of traffic information (Erweiterte Floating Car Datensätze für die Erfassung von Verkehrsinformationen)*; in 'Mobility for Everyone: Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Transport Systems'; 1997 in Berlin

- [9] HOYER, R.: *Wenn die Ampel mit dem Fahrer spricht – Kooperation von Infrastruktur und Fahrzeugen mittels C2I-Kommunikation*; Referat auf dem Presseseminar des Deutschen Verkehrssicherheitsrates; Universität Kassel; 2010 in Kassel
- [10] BLEY, O., KUTZNER, R., FRIEDRICH, B., SAUST, F., WILLE, J., MAURER, M., NIEBEL, W., NAUMANN, S., WOLF, F., SCHÜLER, F., BOGENBERGER, K., JUNGE, M., LANGENBERG, J.: *Kooperative Optimierung von Lichtsignalsteuerung und Fahrzeugführung*; AAET 2011 Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, 2011 in Braunschweig
- [11] LITTLE, J.: *A proof for the queueing formula $L = \lambda * W$. (Ein Beweis für die Rückstaubildungsformel $L = \lambda * W$)*; Operations Research, Vol. 9 (1961), pp. 383-387; Institute of Technology; 1961 in Cleveland, Ohio, U.S.A
- [12] MÜCK, J.: *Schätzverfahren für den Verkehrszustand an Lichtsignalanlagen unter Verwendung halteliniennaher Detektoren*; in HEUREKA ,02; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2002 in Köln
- [13] NOYER, U., SCHMIDT, E., UTESCH, F., WAIGAND, D., KÖSTER, F.: *Betrachtungen zur systematischen Durchführung von Naturalistic Driving Studies*; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach (BASt), 2013 in Braunschweig
- [14] NEUMANN, T.: *Automatische Kalibrierung eines innovativen Verfahrens zur Verkehrslageschätzung an Lichtsignalanlagen auf Basis von Floating Car Daten*; FGSV Verlag, 2011 in Stuttgart
- [15] NEUMANN, T.: *DPAnalyzer: An Example of Combining common and innovative Methods for probe-vehicle-based urban Traffic Monitoring (DPAnalyzer: Ein Beispiel der Kombination herkömmlicher und innovativer Ansätze zum messfahrzeugbasierten Verkehrs-Monitoring)*; IEEE ITSC 2011; 2011 in Washington, D.C., USA
- [16] PRIMER, C. FRIEDRICH, B.: *Optimierung von modellierten Warteprozessen im Rahmen adaptiver Netzsteuerungen durch C2I-Daten*, FGSV Verlag, 2008 in Köln
- [17] QUDDUS, M. A., OCHIENG, W. Y., NOLAND, R. B.: *Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the art and future research directions (Aktuelle Map-Matching Algorithmen für Transportanwendungen: State-of-the-art und zukünftige Forschungsrichtung)*; Band 15, Ausgabe 5, Seiten 312-328, ISSN 0968-090X; Transportation Research Part C: Emerging Technologies; 2007 in London

[18] SCHLAICH, J.; *Nutzungsmöglichkeiten von Floating Phone Data*, Universität Stuttgart, 2005 in Stuttgart

[19] SCHÄFER, R., THIESSENHUSEN, K., WAGNER, P: *A Traffic Information System by Means of Real-Time Floating-Car Data. (Informationssystem basierend auf Echtzeit Floating Car Datensätzen.)*; ITS World Congress 2002; 2002 in Chicago, USA

- Vorträge

[20] BROCKFELD, E.; *Forschung des DLR zum Verkehrsmanagement*; Tag der Verkehrswirtschaft; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), 2011 in Berlin

[21] BRUNTHALER, S.; *Satelliten gestützte Systeme*; Vorlesung im Fach „Ortung und Navigation für Telematikdienste“; Technische Hochschule Wildau, 2006

[22] NEUMANN, T.; *Verkehrslageerfassung, insbesondere Floating Car Daten*; Vorlesung an der TH Wildau im Fach „Verkehrstelematik 2“, 2010 in Wildau

[23] WULFFIUS, H., WEICHENMEIER F.; *Optimale Ausnutzung der Datenerfassungs-Infrastruktur durch Datenfusion*, Dmotion - Vorträge Fachkonferenz "Verkehrsmanagement und Verkehrstechnologien", 2009 in Düsseldorf

- Bücher

[24] OTTO, T.; *Kooperative Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung an signalisierten Knotenpunkten*; Schriftenreihe Verkehr am Institut für Verkehrswesen, Universität Kassel; kassel university press GmbH; 2011 in Kassel

[25] LISTL, G.; *Anwendung neuer Technologien zur Erfassung des Verkehrsablaufs*; Schriftenreihe Verkehr am Institut für Verkehrswesen, Universität Kassel; kassel university press GmbH; 2003 in Kassel

[26] FGSV Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement; *Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA)*; ISBN 978-3-939715-91-7; FGSV Verlag; 2010 in Köln

[27] DODEL, H., HÄUPLER, D; *Satellitenavigation*; 2. Auflage; Springer-Verlag, ISBN 978-3-540-79443-1; 2010 in Berlin

[28] KRENGEL, U.; *Einführung in die Wahrscheinlichkeits-theorie und Statistik*; 8., erweiterte Auflage; Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, 2005 in

Wiesbaden

- Abschlussarbeiten

[29] WAIGAND, D.; *Entwicklung und Optimierung eines Verfahrens zur Erhebung von Fahrdaten in Feldversuchen*; Bachelorarbeit – DHBW, 2011 in Braunschweig

[30] NEUMANN, T.; *Dissertation - Rückstaulängenschätzung an Lichtsignalanlagen mit Floating-Car-Daten*; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) 2010 in Berlin

[31] OERTEL, R.; *Optimierung einer auf Grundlage von Floating-Car-Datensätzen basierenden Lichtsignalanlagesteuerung*; Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2009 in Dresden

- Internet

[32] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR); *Verkehrsmanagement*; http://www.dlr.de/fs/desktopdefault.aspx/tabid-1237/5441_read-7889; letzter Zugriff: 02.09.2013

[33] FOCUS; *Stau kostet Milliarden: Geld im Stand verbrennen*; http://www.focus.de/auto/news/stau-kostet-milliarden-geld-im-stand-verbrennen_aid_878734.html; letzter Zugriff: 13.08.2013

[34] Wikimedia Foundation Inc. (Hrsg.); *Floating Car Data*; http://de.wikipedia.org/wiki/Floating_Car_Data; letzter Zugriff: 10.09.2013

[35] Refsnes Data (Hrsg.); *SOAP Tutorial*; <http://www.w3schools.com/soap>; letzter Zugriff: 11.09.2013

[36] Wikimedia Foundation Inc. (Hrsg.); *SOAP*; <http://en.wikipedia.org/wiki/SOAP>; letzter Zugriff: 16.09.2013

[37] The PostgreSQL Global Development Group (Hrsg.); *About PostgreSQL*; <http://www.postgresql.org/about/>; letzter Zugriff: 30.09.2013

[38] PostGIS Project Steering Committee; *About PostGIS*; <http://postgis.net>; letzter Zugriff: 25.09.2013

[39] World Wide Web Consortium (W3C); *Web Services Description Language (WSDL) 1.1*; http://www.w3.org/TR/wsdl#_introduction; letzter Zugriff: 05.10.2013

[40] Microsoft Corporation (Hrsg.), MicroSoft Developer Network(MSDN) Magazine; *More on REST*; <http://msdn.microsoft.com/de-de/magazine/dd942839.aspx>; Letzter Zugriff: 04.10.2013

[41] KLOSTER, T., MARTIN, O.; *Vergleich SOAP und REST*; Seminar: Komponentenorientierte Softwareentwicklung und Hypermedia; Fachhochschule Dortmund, 2004; http://www.edvsz.hs-osnabrueck.de/fileadmin/compass/Lehrveranstaltungen/SoSe_04/Soap-Rest_Ausarbeitung.pdf; Letzter Zugriff: 04.10.2013

[42] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Portal; <http://www.dlr.de/fs/en/Portaldata/16/Resources/images/FASCar.jpg>; Letzter Zugriff: 22.09.2013

[43] Geneq Inc. Scientific Instruments – SXBlue Webseite; *GPS - The Error Budget*; <http://sxbluegps.com/wp-content/uploads/2012/12/gps-triangulation.jpg>; Letzter Zugriff: 10.10.2013

[44] Gizmag – Portal; <http://images.gizmag.com/hero/audi-travolution.jpg>; Letzter Zugriff: 10.10.2013

[45] Vabene – DLR Portal; *Bodengebundene Sensoren*; <http://vabene.dlr.de/vabene/Galerie/FCD.bmp>; Letzter Zugriff: 10.10.2013

[46] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Portal; http://www.dlr.de/fs/desktopdefault.aspx/tabid-6422/10597_read-37397/; Letzter Zugriff: 11.10.2013

[47] GoogleEarth; <http://www.google.de/intl/de/earth/>; Letzter Zugriff: 10.10.2013

[48] JFreeChart; <http://www.jfree.org/jfreechart/>; Letzter Zugriff: 10.10.2013

- DLR Intern

[49] TOUKO, L.; *Kurzbericht: DOMINION Workshop*; 2010 in Braunschweig

[50] FRANKIEWICZ, T.; *AIM-Referenzstrecke Aktueller Stand und Planung*; 2012 in Braunschweig

Anhang

Inhalt der CD:

- Messkampagnendaten:
 - Programme**
 - Parser der Messkampagne- und Taxi-FCD-Matches (Java-Programm)
 - Parser der Roh Daten der NDS-Plattform - Messkampagnendaten
 - Dokumentation**
 - Roh Daten der NDS-Plattform - Messkampagnendaten
 - Matches der NDS-Plattform basierten FCD
 - Messkampagne-Genehmigungen (Anschreiben und Halteverbote)
 - Kreuzungsauswertungsdaten
- Webservice:
 - Programme**
 - ServiceHub-Implementierung des Webservices (Java)
 - TrackingDataService (Java basierter Dienst)
 - Dokumentation**
 - WSDL-Datei und XSD-Schema des Webservices
- Reisezeiten:
 - Programm**
 - Reisezeiten-Parser (Java-Programm)
 - Dokumentation**
 - Reisezeiten basierend auf Messkampagnendaten
 - Reisezeiten basierend auf Taxi-FCD
- Programm zur Rückstaulängenschätzung
 - Programm**
 - Programm der die Rückstaulängenschätzer implementiert, die Daten für die Auswertung aufbereitet und die Schätzergebnisse im Diagramm darstellt.
- Masterarbeit-Dokument (PDF)
- Quellen
 - PDF Quellen
 - Präsentationen